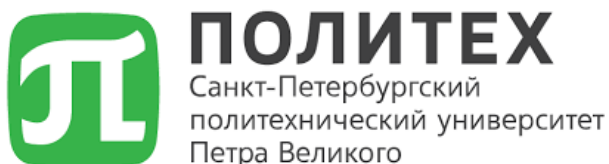


Министерство образования и науки Российской Федерации
Комитет по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Ассоциация технологов-машиностроителей России
Санкт-Петербургское отделение Российской академии наук
Международный союз машиностроителей
Санкт-Петербургская торгово-промышленная палата



СОВРЕМЕННЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В
МАШИНОСТРОЕНИИ
(MTET-2016)

Труды
Международной научно-технической конференции
6-8 октября 2016 г.

MODERN HIGH-PERFORMANCE EQUIPMENT AND
TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING
(MTET- 2016)

Proceedings
International Scientific and Technical Conference
October 6-8, 2016

Санкт-Петербург
2016



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

**СОВРЕМЕННЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В
МАШИНОСТРОЕНИИ
(MTET-2016)**

Труды

Международной научно-технической конференции

6-8 октября 2016 г.

**MODERN HIGH-PERFORMANCE EQUIPMENT AND
TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING
(MTET- 2016)**

Proceedings

International Scientific and Technical Conference

October 6-8, 2016

Санкт-Петербург

2016

Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (MTET-2016) Modern high-performance equipment and technologies in mechanical engineering (MTET-2016): Труды международной научно-технической конференции. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та. 2016 – 274 с.

Конференция посвящается 300-летию создания А.К. Нартовым первого в мире токарного станка

В трудах представлены доклады, отражающие современное состояние исследований и производственных достижений в области технологии машиностроения. Участники конференции представляют российские и зарубежные организации.

Тематические направления конференции:

Современные высокоэффективные процессы и технологии лезвийной и абразивной обработки заготовок, оборудование и инструмент;

Инженерия высококачественных поверхностей и кромок, модификация поверхностных слоев деталей, покрытия;

Обработка композиционных материалов.

Доклады публикуются в авторской редакции. Оргкомитет не несет ответственности за стиль и форму изложения представленного материала.

Ответственный за выпуск – сопредседатель оргкомитета конференции д.т.н., проф. Ю.М. Зубарев

Редактор – ученый секретарь конференции, доцент А.И. Круглов

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Организационный комитет

Председатель
проф. Попович А.А.

Сопредседатели
Проф. Зубарев Ю.М.
Проф. Приемышев А.В.

Организационный комитет
Проф. Иванов А.В. (С.-Петербург)
Проф. Суслов А.Г. (Москва)
Проф. Окрепилов В.В. (С.Петербург)
Проф. Катенев В.И. (С.Петербург)
Чл.-корр. РАЕН Глухих В.К.
(Москва)
Проф. Гутенев В.В. (Москва)
Проф. Максаров В.В. (С.Петербург)
Проф. Маслов А.Р. (Москва)
Проф. Бочкарев П.Ю. (Саратов)
Проф. Кожина Т.Д. (Рыбинск)
Проф. Безъязычный В.Ф. (Рыбинск)
Проф. Григорьев С.Н. (Москва)
Проф. Киричек А.В. (Брянск)
Проф. Макаров В.Ф. (Пермь)
Проф. Смоленцев В.П. (Воронеж)
Проф. Степанов Ю.С. (Орел)

Ученый секретарь конференции
Доцент Круглов А.И.

Organizing Committee

Chairman
Prof. Popovich A. A.

Co-Chairmen
Prof. Zubarev Yu.M.
Prof. Priemyshev A.V.

Organizing Committee
Prof. Ivanov A.V. (St. Petersburg)
Prof. Suslov A.G. (St. Petersburg)
Prof. Okrepilov V.V. (St. Petersburg)
Prof. Katenev V.I. (St. Petersburg)
Corr. Member of RANS
Glukhih V.K. (Moscow)
Prof. Gutenev V.V. (Moscow)
Prof. Maksarov V.V. (St. Petersburg)
Prof. Maslov A.R. (Moscow)
Prof. Bochkarev P.Yu. (Saratov)
Prof. Kozina T.D. (Rybinsk)
Prof. Bezyazichny V.F. (Rybinsk)
Prof. Grigoriev S.N. (Moscow)
Prof Kirichek A.V. (Bryansk)
Prof Makarov V.F. (Perm)
Prof Smolentsev V.P. (Voronezh)
Prof Stepanov Yu.S. (Orel)

Scientific Secretary of the Conference
Associate Professor Kruglov A. I.

Раздел 1

Лезвийные и абразивные методы обработки заготовок

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Валентин Григорьевич Юрьев, к.т.н., доцент
Юрий Михайлович Зубарев, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел. (812) 540-58-37, e-mail: yurev_mv@rambler.ru

Аннотация

Рассмотрены основные особенности, преимущества и недостатки технологических систем, используемых при ленточном шлифовании. При анализе во внимание принята жесткость технологической системы и регламентация радиальной подачи (глубины резания) или усилия взаимодействия инструмента с заготовкой. Для технологических систем низкой жесткости показаны принципы определения изменения усилия прижима ленты к обрабатываемой поверхности с течением времени обработки для удаления заданного припуска.

Ключевые слова: технологическая система, шлифовальная лента, контактный ролик, усилие прижима, жесткость, продолжительность обработки, глубина резания, скорость снятия металла, шероховатость

Основные особенности и свойства технологических систем ленточного шлифования во многом определяются высокой или низкой их жесткостью, а также регламентацией радиальной подачи (подачей на глубину) или усилия взаимодействия инструмента с заготовкой. Комбинация названных параметров для технологических систем может иметь четыре предельных варианта исполнения:

1. *Радиальная подача регламентируется с высокой точностью, при этом используется технологическая система высокой жесткости.* Совокупностью этих свойств стремятся наделить при проектировании и эксплуатации преобладающее большинство технологических систем металлорежущих станков, в числе ленточно-шлифовальных. Применение таких технологических систем обеспечивает наиболее высокую точность перемещения инструмента относительно заготовки, установочных поверхностей приспособления или станка и, соответственно, высокую

точность обработки, максимальное исправление исходной погрешности и минимальное ее копирование на обработанной поверхности.

Наиболее общий характер изменений параметров процесса ленточного шлифования с увеличением продолжительности обработки показан на рис. 1. Нормальная составляющая силы резания P_y зависит от глубины резания t , а значение t определяет радиальная подача. Разница между радиальной подачей и глубиной резания t определяется деформацией технологической системы (без учета износа инструмента и других погрешностей). В связи с затуплением режущих кромок абразивных зерен с течением времени обработки режущая способность инструмента понижается, увеличивается сила резания P_y , а большей величине P_y соответствует большая деформация технологической системы. Поэтому глубина резания t и, соответственно, скорость снятия металла Q'_m несколько снижаются. Чем меньше изменения P_y и чем выше жесткость, тем в меньшей мере изменяются t и Q'_m с увеличением продолжительности обработки.

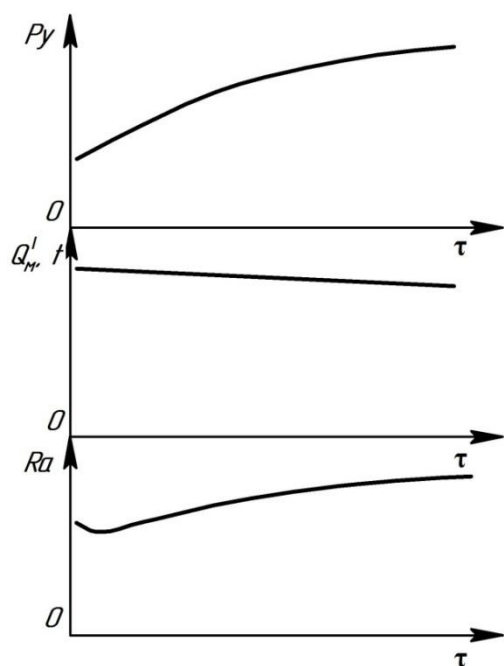


Рис. 1. Влияние продолжительности ленточного шлифования τ на параметры процесса в условиях жесткой технологической системы: P_y - нормальная составляющая силы резания, глубина резания t , скорость снятия металла Q'_m , шероховатость обработанной поверхности Ra

Затупление абразивных зерен повышает уровень пластических деформаций обрабатываемого металла в процессе резания, а это увеличивает шероховатость обработанной поверхности Ra , хотя на начальном этапе шлифования может наблюдаться и некоторое ее снижение.

Нормальная составляющая силы резания P_y является функцией глубины резания t , продолжительности обработки τ , других параметров режима резания, свойств обрабатываемого металла, особенностей инструмента, условий шлифования и др. Для рассматриваемой технологической системы характерна зависимость:

$$P_y = f_1(t, \tau, \dots). \quad (1)$$

2. *Регламентируется радиальная подача при пониженной или низкой жесткости технологической системы.* Совокупностью таких свойств, как правило, обладает модернизированное оборудование, изначально разработанное с учетом требований, рассмотренных выше (см. п. 1). Такое оборудование снабжают специальными приспособлениями понижающими жесткость, а наиболее часто эксплуатируют, применяя режущие инструменты, имеющие низкую жесткость контакта с заготовкой, что создает наиболее благоприятные условия для формирования минимальной шероховатости обработанной поверхности. Требования к точности отступают на второй план; точность поверхности формируется на предыдущих операциях. В таких случаях радиальная (иногда осевая) подача используется лишь для создания определенного натяга (деформации, сближения) между инструментом и заготовкой, а конечном итоге - усилия взаимодействия между ними в нормальном направлении. Высокая точность радиальной подачи теряет актуальность. Такой вариант технологических систем обычно применяют для операций, ставящих целью снижение шероховатости обработанных поверхностей.

3. *Регламентируется прямо или косвенно нормальная составляющая силы резания P_y при высокой жесткости технологической системы.* В таких случаях необходимо использовать системы управления процессом обработки. Например, адаптивное управление процессом шлифования пера турбинных лопаток по результатам измерения нормальной составляющей силы резания или эффективной мощности позволяет корректировать программу формообразования непосредственно в ходе

обработки, компенсируя линейные и угловые смещения профилей пера от номинального расположения, в т. ч. возникшие за счет деформации профиля на предшествующей и данной операциях [7]. Практическое применение таких систем достаточно ограничено.

4. *Регламентируется нормальная составляющая силы резания P_y при низкой жесткости технологической системы.* Требуемая величина силы взаимодействия инструмента и заготовки P_y (рис. 2) сравнительно просто устанавливается за счет собственных масс инструмента и несущих его элементов, дополнительных грузов, пружин, пневмо- или гидроцилиндров, а также их комбинаций, часто применяя шарнирные соединения. К такому варианту технологических систем можно также отнести системы, имеющие место при ручной обработке (зачистка, удаление заусенцев, полирование и т. д.).

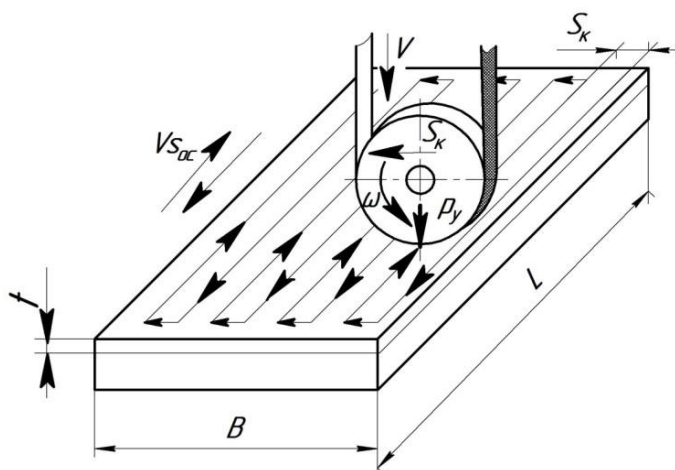


Рис. 2. Схема ленточного шлифования с регламентированным усилием P_y прижима инструмента к заготовке: ω – угловая скорость вращения контактного ролика; V – скорость движения ленты, равная скорости шлифования; V_{soc} – скорость осевой (продольной)

поддачи; S_k – касательная подача (при ленточном шлифовании ее часто называют строчечной или подачей на строку); t – глубина резания; L , B – длина и ширина шлифуемой поверхности. (Касательная подача S_k может быть прямолинейной и (или) угловой. В последнем случае она выполняется поворотом заготовки)

Основная цель операций, выполняемых с использованием технологических систем низкой жесткости – повышение качества обработанных поверхностей, чаще всего, снижение шероховатости. Точность обработки не повышается и даже может несколько снизиться, погрешности не исправляются. В отдельных случаях повышение точности возможно,

например, используя метод пробных ходов и промеров, выборочное шлифование отдельных участков поверхности и др.

Примерами рассматриваемой технологической системы могут служить ленточно-шлифовальные станки «Metabo», используемые для шлифования и полирования рабочих поверхностей турбинных лопаток. Подобные схемы обработки иногда называют безразмерными, безкопирными, полусвободными и др.

На рис. 3 представлен наиболее общий характер изменений параметров процесса ленточного шлифования с увеличением продолжительности обработки при низкой жесткости технологической системы и регламентированном значении P_y .

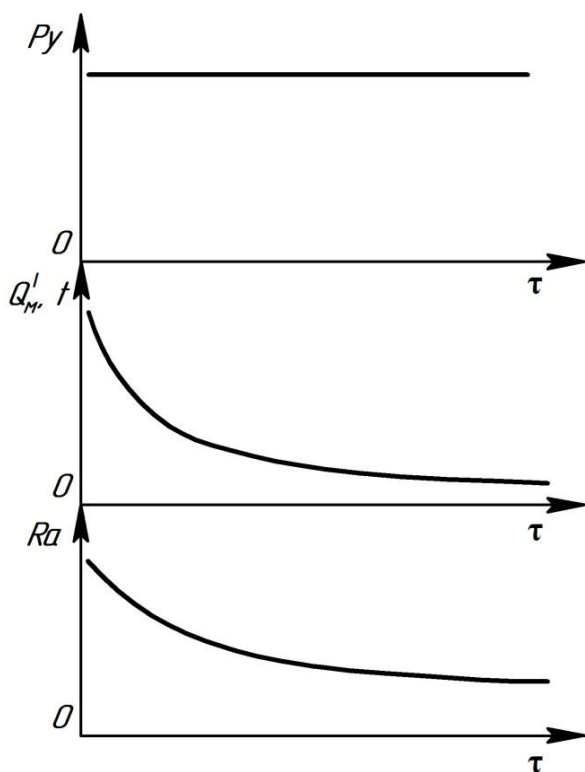


Рис. 3. Влияние продолжительности ленточного шлифования τ на параметры процесса в условиях технологической системы низкой жесткости и постоянной величины силы P_y . Обозначения см. на рис. 1.

При постоянной величине P_y глубина резания t и скорость снятия материала Q_m' непрерывно снижаются. Это обусловлено снижением режущей способности инструмента при затуплении режущих кромок абразивных зерен рабочей поверхности инструмента. Соответственно снижается шероховатость обработанной поверхности Ra . Режущие кромки с площадками износа оставляют менее глубокие риски-царапины, а с течением времени шлифования все большее число затупленных зерен вместо резания выполняет выглаживание.

Глубина резания t , а также скорость снятия металла Q'_m , являются функцией усилия P_y прижима инструмента к обрабатываемой поверхности, зависят от других параметров режима шлифования (V , V_{soc} , S_k), продолжительности обработки τ , свойств обрабатываемого металла, характеристики инструмента, условий обработки и др. Для рассматриваемой технологической системы характерна основная зависимость:

$$t = f_2(P_y, \tau, \dots). \quad (2)$$

Важнейшим достоинством таких технологических систем является их сравнительная простота при обеспечении возможности финишной обработки фасонных поверхностей без сложного и точного относительного перемещения заготовки и инструмента, исключается высокая точность ориентации фасонной поверхности при базировании, нет необходимости учета деформации элементов технологической системы, в т. ч. обрабатываемой заготовки низкой жесткости.

Основной недостаток рассматриваемой технологической системы заключается в необходимости постоянного или периодического увеличения P_y для обеспечения заданной глубины резания t (фактически снимаемого припуска) и, соответственно, скорости снятия металла Q'_m с увеличением времени обработки. Колебания глубины резания t – основная причина снижения точности обрабатываемой поверхности. Сохранить требуемую величину t при затуплении ленты можно также уменьшая скорость осевой V_{soc} , а также касательной подачи S_k (рис. 2), однако это снижает производительность обработки. В то же время регулировать V_{soc} и S_k в момент обработки на станках с ЧПУ несколько проще, чем P_y . В этом появляется необходимость при оптимизации технологических процессов. Следует заметить, что при обработке фасонных поверхностей изменение глубины шлифования t зависит также от положения зоны контакта инструмента относительно обрабатываемой поверхности, ее формы и кривизны; направления движения ленты.

Во многих случаях в ходе выполнения операции ленточного шлифования операторы-шлифовщики силу P_y увеличивают, используя личный опыт. Более строгие закономерности изменения силы P_y с увеличением продолжительности шлифования можно получить экспериментальным путем для конкретных условий обработки, обрабатываемого металла, характеристики режущего инструмента, режимных параметров и др.

При назначении режимов шлифования рационально применять приведенное усилие прижима

$$P_y^* = \frac{P_y}{h}, \text{ Н/мм}; \quad (3)$$

где P_y , Н; h – ширина контакта ленты с обрабатываемой поверхностью, мм.

Требуемая скорость снятия металла определяется по формуле

$$Q'_m = Q^*_m \cdot h = t \cdot S_k \cdot V_{\text{soc}}, \text{ мм}^3/\text{мин}; \quad (4)$$

где Q^*_m – скорость снятия металла, приведенная к 1 мм ширины h контакта ленты с обрабатываемой поверхностью, мм; t , мм; S_k , мм/ход; V_{soc} , мм/мин.

Из формулы (4) можно сделать вывод о том, что при установленных значениях S_k , V_{soc} и требуемой величине t шлифовальная лента должна обеспечивать скорость снятия металла Q'_m .

Для оценки действительных (реальных) режущих свойств инструмента выполняются экспериментальные исследования, в которых находят зависимость, например, приведенной скорости снятия металла от ряда параметров и условий обработки

$$Q_{\text{д}}^*_m = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – параметры процесса и условий обработки.

Как правило, для сложных фасонных поверхностей получение зависимостей (5) даже для двух-трех параметров представляет значительные трудности. В таких случаях целесообразно эксперименты выполнять по упрощенным схемам обработки, например, обрабатывать плоскости, использовать врезное шлифование призматических образцов и др. В отдельных экспериментах установлено, что для рассматриваемой схемы

обработки изменение S_k и V_{soc} практически мало влияет на $Q_{д\ m}^*$, в особенности при использовании контактных роликов низкой жесткости, что позволяет более широко применять врезное шлифование ($S_k = 0, V_{soc} = 0$) для этой цели. В самом простом случае, когда заранее известна характеристика шлифовальной ленты и скорость шлифования, в экспериментах устанавливается зависимость $Q_{д\ m}^*$ от продолжительности обработки τ и усилия P_y для конкретного обрабатываемого металла и заданных условиях обработки. В предположении, что экспериментальные данные аппроксимируются, например, степенной функцией, можно записать

$$Q_{д\ m}^* = C_Q \cdot P_y^{*a} \cdot \tau^b, \quad (6)$$

где C_Q, a, b – коэффициент и показатели степени, соответственно.

Решая совместно уравнения (4) и (6) с учетом (3) найдем выражение для изменения усилия прижима ленты P_y к обрабатываемой поверхности с течением времени обработки для обеспечения заданной величины скорости снятия металла $Q_{м}^*$

$$P_y = \sqrt[a]{\frac{t \cdot S_k \cdot V_{soc}}{C_Q \cdot \tau^b \cdot h^{1-a}}}. \quad (7)$$

С меньшими затратами времени требуемую зависимость можно экспериментально получить используя специальный способ определения усилия прижима ленты при шлифовании, при котором в одном эксперименте с течением времени периодически изменяют величину P_y и одновременно фиксируют $Q_{д\ m}^*$. Полученные данные затем используются аналогично предыдущим. Более простой способ определения усилия прижима ленты при шлифовании заключается в том, что в эксперименте, например, при врезном шлифовании поддерживают требуемую скорость снятия металла (в конечном итоге - скорость радиальной подачи) на образце, устанавливая зависимость P_y от времени обработки τ . Полученную зависимость в дальнейшем повторяют для реальных процессов ленточного шлифования заготовок. Наиболее просто такой эксперимент выполнить, используя

технологическую систему высокой жесткости при регламентированной подаче (см. п. 1).

Основное время T_0 без учета возможных недошлифованных участков по краям обрабатываемой поверхности (рис. 2) можно определить по формуле

$$T_0 = B \cdot L / (S_k \cdot V_{soc}) = S / (S_k \cdot V_{soc}), \text{ мин}; \quad (8)$$

где S – площадь обрабатываемой поверхности, мм²; B , мм; L , мм; S_k , мм/ход; V_{soc} , мм/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник // Под ред. А. Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. - 391с.
2. Бабошкин А. Ф., Юрьев В. Г. К вопросу о повышении производительности ленточного шлифования. // Неконвенциональные технологии в машиностроении «АМО-89»: Сб. тр. 4-го Междунар. н-т. семинара. НРБ, Ботевград: 1989. - Том 2. - С. 449...455.
3. Вerezub В. Н. Шлифование абразивными лентами. - М.: Машиностроение, 1972. - 103 с.
4. Кремень З. И., Юрьев В. Г., Бабошкин А. Ф. Технология шлифования в машиностроении. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
5. Моисеева Л. Т. Адаптивное управление размерным шлифованием пера крупногабаритных лопаток газотурбинных двигателей // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы «Шлифаабразив-99»: Сб. тр. Международной н.-т. конф. – Волжский: ВолгГСА, 1999. – С. 219...220.
6. Паньков Л.А., Костин Н.В. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки. - Л.: Машиностроение, 1988. - 235 с.
7. Стратиевский И. Х., Юрьев В. Г., Зубарев Ю. М. Абразивная обработка. Справочник. - М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.
8. Юнусов Ф.С., Фельдман Ю.Я. Шлифование крупногабаритных деталей маятниковыми головками. - М.: Машиностроение, 1981. - 120 с.

9. Юрьев В. Г. Влияние правки абразивных лент на показатели процесса обработки // Инструмент и технологии. - СПб.: 2002, № 7...8. С. 240...243.
10. Юрьев В. Г., Дугин В. Н., Мусаэлян А. А., Большаков И. С. Шероховатость поверхности при безразмерном ленточном шлифовании // Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин: Сб. научн. тр. - Брянск: 1988. - С. 80...84.
11. Юрьев В. Г., Дугин В. Н., Мусаэлян А. А. Моделирование процесса ленточного шлифования сложнопрофильных поверхностей // Интенсификация процессов абразивной обработки и повышение качества деталей. Труды ВНИИАШ. – Л.: 1988. – С. 36...42.
12. Юрьев В. Г., Зубарев Ю.М., Бабошкин А.Ф. Новые технологии в производстве турбинных лопаток // Инструмент и технологии. - СПб.:1998, № 11.- С. 24...25.
13. Юрьев В. Г., Приемышев А. В. О классификации технологических систем по уровню жесткости // Инструмент и технологии. СПб.: 2004, № 17...18. - С. 245...248.
14. Юрьев В. Г. А.с. 1824291 СССР, МКИ В 24 В 21/16, 1/00. Способ определения усилий прижима абразивной ленты при шлифовании // Открытия. Изобретения. 1993. № 24.

V. G. Yuriev, Y. M. Zubarev

THE TECHNICAL SYSTEM OF BELT GRINDING AND THEIR FEATURES

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Abstract

Basic features, advantages and disadvantages of technological systems used in belt grinding. In the analysis, into account adopted by the rigidity of the technological system and the regulation of radial feed (depth of cut) or force interaction with the piece. For technological systems lowest stiffness shows the principles of determining the variation of the contact force of the tape to the treated surface for a treatment time to remove the specified allowance.

Keywords: technological system, sanding belt, contact roller, contact pressure, stiffness, length, cutting depth, speed of material removal, roughness

E.L.Zhukov, Candidate of Engineering Sciences, professor at the department «Mechanical Engineering», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation, St. Petersburg.

I.N.Khrustaleva, Postgraduate at the department of «Mechanical Engineering», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation, St. Petersburg.

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru, Тел. +7(911)729-41-65

Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе имитационного моделирования

Abstract: In the article the questions of technological preparation of production. It was developed a simulation model of production process (machining) using a modular principle and queuing theory. It was developed the classification of modules. Choosing the optimal option of production process is based on analysis of economic indicators and quality indicators (precision machining).

Keywords: technological preparation of production, simulation model, modular principle, queuing theory, production process, machining, detail.

Машиностроение является одной из ведущих отраслей производства, затрагивающая практически все сферы деятельности человека. Продукция машиностроительной отрасли отличается сложностью, разнообразием конструкторских решений и применением широкого наименования материалов с различными физико-механическими свойствами. Конструкция изделия и материал, из которого оно изготовлено, оказывают существенное влияние на выбор методов формообразования и средств технологического оснащения.

Для производства одних и тех же деталей могут применяться различные методы формообразования и средства технологического оснащения, что приводит к большому разнообразию вариантов производственного процесса. При данных условиях наиболее рациональным методом выбора оптимального варианта производственного процесса является метод имитационного моделирования. На основе данного метода

была разработана модель, имитирующая производственный процесс обработки заданной номенклатуры деталей. Определение оптимального варианта производственного процесса производится на основе анализа экономических показателей и показателей качества продукции. На рис. 1 представлена схема имитационной модели.

В основу имитационной модели был положен модульный принцип организации производства. В связи с этим была разработана классификация модулей, которые были разделены на пять групп: конструкторские модули, заготовительные модули, технологические модули, модули параметров и модули технологических баз. Разработанная имитационная модель состоит из пяти этапов.

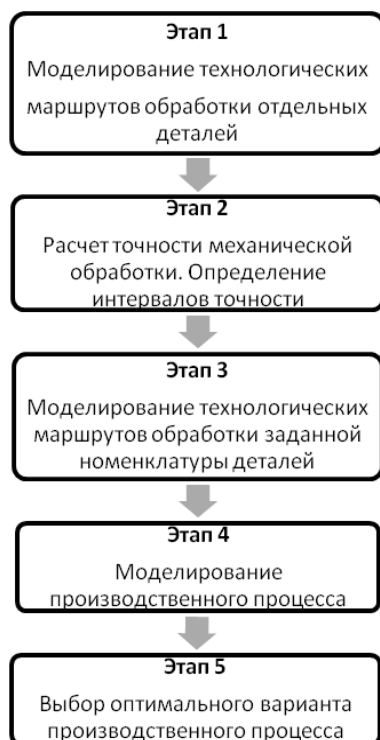


Рис. 1. Схема имитационной модели для определения оптимального варианта производственного процесса обработки заданной номенклатуры деталей.

На *первом этапе* производится моделирование технологических маршрутов обработки отдельных деталей. Задачей данного этапа моделирования является формирование технологических модулей детали (МДТ), которые содержат информацию о методах и стратегиях обработки детали, а также наименование средств технологического оснащения

необходимых для достижения заданных значений технических параметров на каждом этапе обработки.

На *втором этапе* производится анализ точности механической обработки. Задачей этого этапа моделирования является формирование интервалов точности механической обработки и определение допустимых значений режимов резания и машинного времени обработки для каждого интервала точности. Анализ точности механической обработки производится на основе расчета величины суммарной погрешности, которая определяется по формуле [3,5]:

$$\Delta = f(\varepsilon, \Delta_y, \Delta_u, \Delta_n, \Delta_T, \sum \Delta_\phi) \quad (1)$$

Где ε – погрешность, связанная с установкой заготовки на металлорежущий станок или приспособление, мкм; Δ_y – погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы, мкм; Δ_u – погрешность, возникающая в результате размерного износа режущего инструмента, мкм; Δ_n – погрешность, связанная с настройкой режущего инструмента, мкм; Δ_T – погрешность, вызываемая тепловыми деформациями технологической системы, мкм; $\sum \Delta_\phi$ – погрешность, связанная с геометрическими отклонениями оборудования, мкм.

На *третьем этапе* производится формирование всех возможных вариантов производственного процесса (групповых технологических модулей). Структура группового технологического модуля представлена на рис. 2.

На *четвертом этапе* производится моделирование производственного процесса на основе теории массового обслуживания (ТМО). Задачей данного этапа моделирования является определение параметров производственной системы для различных вариантах производственного процесса. В качестве модели на данном этапе будет выступать замкнутая сеть массового обслуживания (ЗСМО).

На *пятом этапе* производится выбор оптимального варианта производственного процесса по трем группам показателей: точность

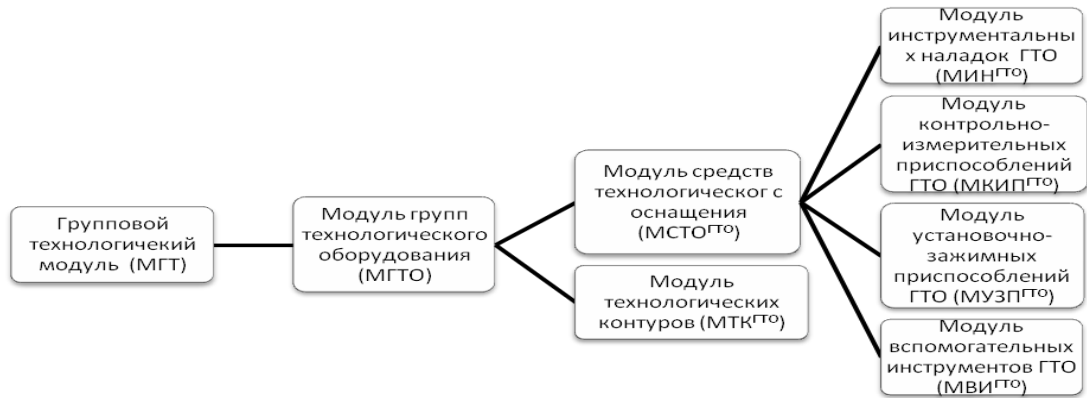


Рис. 2 Структура группового технологического модуля

механической обработки, стоимость инвестиционного проекта и параметры производственной системы. Определение оптимального варианта можно разделить на два этапа. На первом этапе определяется множество оптимальных решений на основе метода Парето – *парето-оптимальные решения*. На втором этапе с помощью *метода идеальной точки* из множества парето-оптимальных решений производится выбор того варианта производственного процесса, который имеет оптимальное сочетание экономических параметров и параметров качества. Для расчета расстояния до идеальной точки была выбрана формула взвешенного евклидового расстояния, которая имеет следующий вид [1]:

$$d_{\varepsilon E}(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p w_k (x_i^{(k)} - x_j^{(k)})^2}$$

Где $d_{\varepsilon E}$ – взвешенное евклидово расстояние, $x_i^{(k)}$ – значение k -ого свойства объекта i , $x_j^{(k)}$ – значение k -ого свойства объекта j , w_k – “вес” k -ого критерия, p – количество критериев.

Оптимальным вариантом производственного процесса будет считаться вариант с минимальным значением взвешенного евклидового расстояния.

Выводы:

Разработанная имитационная модель позволяет:

1. Определить все возможные варианты производственного процесса обработки деталей и структуры производственной системы.

2. Оценить точность изготовления деталей на каждом этапе обработки для различных методов и стратегий формообразования.
3. Определить перечень средств технологического оснащения, необходимых для процесса обработки деталей, и их количество.
4. Определить затраты, необходимые для реализации каждого варианта производственного процесса.
5. Оценить эффективность структуры производственной системы.
6. Определить оптимальный вариант производственного процесса с учетом экономических показателей и показателей качества продукции.

Список литературы

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрика / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1005 с.
2. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с., ил.
3. Технология машиностроения: В 2 т. Т.1. Основ технологии машиностроения: Учебник для вузов/ В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. А.М. Дальского. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 564 с., ил.).
4. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3е изд. – СПб.: Питер, Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.: ил.
5. Основы технологии машиностроения: Этапы проектирования и точность технологических процессов: Учеб. пособие / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, С.Л. Мурашкин, и др.; Под ред. С.Л. Мурашкина – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 408 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1/Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с., ил.

Г.Д. Петухов, В.Ф. Макаров

**РАСЧЕТ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛ РЕЗАНИЯ НА ЗАМОК
ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ
ПРОТЯГИВАНИИ**

Григорий Дмитриевич Петухов, аспирант ПНИПУ, АО «ОДК-ПМ», РФ,
г. Пермь, 89223048544, el190980@yandex.ru;

Владимир Федорович Макаров, доктор т.н., ПНИПУ, РФ, г. Пермь,
makarovv@pstu.ru.

Аннотация: Рассмотрены силы, возникающие на режущей кромке в процессе вытягивания одновременно с трех сторон. Приведены формулы для расчета равнодействующей силы. Предложен метод уменьшения общей силы резания при изменении угла режущей кромки. Приведены примеры расчета расположения сменных твердосплавных пластин для конструкторского проектирования протяжного инструмента. Выведен рекомендуемый коэффициент для расчета заготовок из различных сплавов. Доказана эффективность поворота вставок для уравнивания нагрузки. Приведен пример расчета жаропрочных сплавов.

Ключевые слова: сборная протяжка, сила резания, равнодействующая сила, режущая пластина, лопатка компрессора, угол наклона, разрыв пера, схема, замковая поверхность, проектирование, оптимизация нагрузки, решение, формула, расчет.

Обработку сложных фасонных поверхностей замков лопаток и пазов в дисках и кольцах ГТД на различных заводах моторостроения ведут различными методами: фрезерованием, маятниковым шлифованием, протягиванием и глубинным шлифованием. Одним из наиболее производительных методом обработки замковых поверхностей лопаток компрессора является протягивание [1].

Применение сборных конструкций режущего инструмента позволяет более гибко использовать режимы резания, быстро производить переналадку

в случае поломки (замена пластины), снижать трудоемкость, получать более точную и чистую обрабатываемую поверхность и т.д. [2].

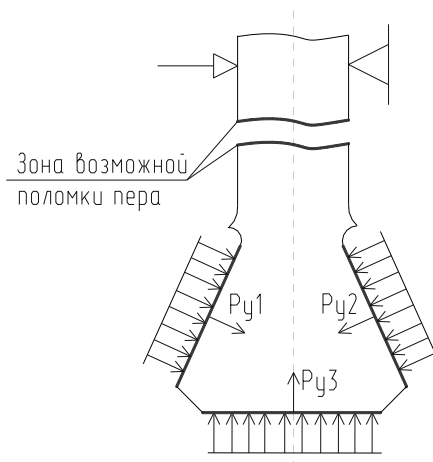


Рис. 1. Направление сил резания P_y при протягивании замковых поверхностей лопатки компрессора одновременно с трех сторон

На рис. 1 видно, что силы резания P_{y1} и P_{y2} действуют вниз как бы вытягивания перо лопатки. Суммы этих сил собственно и может произвести разрушение. Другая сила P_{y3} действует вверх, она нейтрализует влияние этих сил. Однако при большом значении силы, действующей вверх, она может наоборот сжимать ребро лопатки. При данном условии разрушения не произойдет, но перо может деформироваться и образоваться внутренние напряжения. Оптимальным решение будет свести равнодействующую силу резания к минимальному (неопасному) значению, либо к нулю.

Разложим боковые силы P_y на составляющие части:

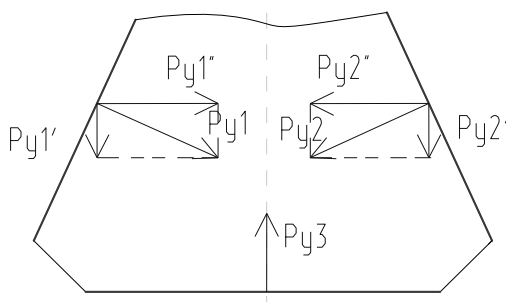


Рис. 2. Направление сил резания P_y при протягивании замковых поверхностей лопатки компрессора одновременно с трех сторон

Из рис. 2 видно, что противодействующими силами для P_{z3} являются силы P_{y1}' и P_{y2}' . Они действуют в одной плоскости и направлены строго в противоположную сторону.

Выводим формулу равнодействия сил в поперечной плоскости:

$$P_{y1}' \cdot \sin \omega_1 + P_{y2}' \cdot \sin \omega_2 + P_{y3}' \cdot \sin \omega_3 + P_{x1}' \cdot \sin \alpha_1 + P_{x2}' \cdot \sin \alpha_2 = 0, \quad (1)$$

где P_{x2} и P_{x3} - силы резания, возникающие при наклоне режущей кромки твердосплавной пластины, α - угол наклона силы P_x .

Угол α практически всегда будет равняться 270° , $\sin(270^\circ) = -1$. Знак минус обозначает противоположное направление действия силы (вниз).

Получив необходимые формулы для проектирования сборных конструкций протяжного инструмента, произведем расчет по предыдущим данным. Длины обрабатываемых сторон равняются $L_1=4\text{мм}$, $L_2=4\text{мм}$, $L_3=11\text{мм}$.

$$P_{y1}' = pL_1 \sin \omega_1 = 1180 \cdot 4 \sin(340^\circ) = 1180 \cdot 4(-0,342) = -1614,5 \text{ МПа} ,$$

$$P_{y2}' = pL_2 \sin \omega_2 = 1180 \cdot 4 \sin(340^\circ) = 1180 \cdot 4(-0,342) = -1614,5 \text{ МПа} ,$$

$$P_{y3}' = P_{y3} = pL_3 \sin \omega_3 = 1180 \cdot 11 \sin 90^\circ = 1180 \cdot 11 \cdot 1 = 12980 \text{ МПа} ,$$

$$P_{z1} = pL_1 = 1180 \cdot 4 = 4720 \text{ МПа} .$$

Т.к. $L_1=L_2$, следует, что $P_{z1} = P_{z2}=4720 \text{ МПа}$.

Находим силы P_x :

$$P_{x1} = P_{x2} = P_z \sin 45^\circ = 3337,54 \text{ МПа} .$$

Произведем расчет равнодействующей силы:

$$P_{y1}' + P_{y2}' + P_{y3}' + P_{x1} \sin \alpha_1 + P_{x2} \sin \alpha_2 = -1614,5 - 1614,5 + 12980 + (-1)3337,54 + (-1)3337,54 = 3075,92 \text{ МПа}.$$

Действующие боковые силы и наклон режущих пластин в сумме уменьшает действие P_{y3} в 4,22 раза. Изменение угла наклона режущих кромок снизило действие наибольшей силы почти в 2 раза.

При проведении экспериментальных работ доказано, что при помощи изменения углов можно влиять на суммарную силу резания P_y за счет увеличения зоны резания L отдельных сил P_{y1}' , P_{y2}' , P_{y3}' .

При анализе была выведена зависимость степени изменения для различных материалов. При расчетах силы резания P_y используется значение силы резания p , приходящей на 1мм длины лезвия. Для сплава ВТ8М $p = 1180$ МПа, у сплава ЭИ787-ВД $p = 1180$ МПа, у сплава ВЖЛ-14 $p = 950$ МПа [3]. Исходя из известных значений удельных сил выводим закономерность через коэффициент наклона K_n угла резания.

Таблица 1

Материал	Удельная сила резания p , МПа	Коэффициент наклона K_n угла режущей кромки пластины
Титановый сплав ВТ8М	1180	1,24
Жаропрочный сплав ЭИ-787-ВД	1180	1,24
Жаропрочный литейный сплав ВЖЛ-14	950	1

Из таблицы 1 видно, что при проектировании сборной конструкции протяжки с применением наклонных режущих зубьев (для уравнивания/снижения суммарной силы резания) необходимо применять коэффициент наклона K_n для различных авиационных материалов. Для обработки лопаток с одинаковыми размерами, но из различного материала, рекомендуемый угол наклона зуба будет равен $K_n \cdot \varphi$.

Из представленных расчетов видно, что для снижения доминирующей нагрузки в два раза необходимо развернуть режущую кромку пластины под следующим углом:

- титановый сплав ВТ8М – угол наклона 45° ,
- жаропрочный сплав ЭИ-787-ВД - угол наклона 45° ,
- жаропрочный литейный сплав ВЖЛ-14 - угол наклона $36,45^\circ$.

Вывод

При обработке замковых поверхностей лопаток компрессора одновременно с трех сторон возникает опасность поломки пера лопатки ввиду малой жесткости.

Одним из решений этой проблемы является уравнивание (снижение) суммарной силы резания путем изменения угла наклона режущей кромки сменной твердосплавной пластины. Изменение угла наклона ω увеличивает длину рабочей зоны L_1 до L_2 .

При изменении угла резания сила резания P_z разбивается на два вектора. При этом возникает сила P_x , которая тоже оказывает своё влияние на общую силу резания.

Экспериментально подтверждена возможность корректировки значения силы резания P_y во избежание поломок тонких элементов лопатки компрессора (по перу).

Для обработки лопаток с одинаковыми размерами, но из различного материала, рекомендуемый угол наклона зуба будет равен $K_n \cdot \varphi$.

Для снижения суммарной силы резания на определенную величину при обработке сплавов требуется различные углы наклона режущей кромки, который рассчитывается по приведенным формулам.

Библиографический список

1. Макаров В.Ф., Петухов Г.Д. Расчет и проектирование сборных конструкций протяжек для скоростного протягивания замков лопаток компрессора / Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. Пермь, 2015. Т. 17, № 3. С. 101-109.

2. Макаров В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография / Старый Оскол: ТНТ, 2014. 440 с.
3. Александров, В.Г. Справочник по авиационным материалам / М.: Транспорт, 1972. 328 с.

G.D. Petukhov, Joint stock company "United engine Corporation (UEC - Perm motors), the Russian Federation, city Perm.

V.F. Makarov, Perm Science-Research Polytechnic University, the Russian Federation, city Perm.

Abstract: Consider the forces arising on the cutting edge in the process of pulling simultaneously on three sides. Formulas for calculation of resultant force. A method is proposed for reducing the overall cutting force by changing the angle of the cutting edge. Examples of the calculation of the location of indexable carbide inserts for the design team design the broaching tool. The recommended ratio is derived for the calculation of workpieces of different alloys. Proved the efficiency of rotation of the inserts to balance the load. The example of calculation of high-temperature alloys.

Keywords: national broach, cutting force, resultant force, re-binder plate, vane compressor, the inclination angle, the gap of the pen, diagram, locking in surface, design, optimization, training, solution, formula, calculation.

В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С. В. Орлов

**Моделирование упругой деформации подшипниковых колец
при закреплении и механической обработке**

Владимир Андреевич Носенко, д.т.н., профессор, зав. кафедрой
«Технология и оборудование машиностроительных производств»

ВПИ (филиал) ВолгГТУ, Россия, г. Волжский E-mail: nosenko@volpi.ru;

Владимир Николаевич Тышкевич, к.т.н., доц., зав. кафедрой «Механика»

ВПИ (филиал) ВолгГТУ, Россия, г. Волжский E-mail: tubem@mail.ru;

Александр Васильевич Саразов, ст. преп. кафедры «Механика»

ВПИ (филиал) ВолгГТУ, Россия, г. Волжский E-mail: mechanic@volpi.ru;

Сергей Васильевич Орлов, к.т.н., зав. лаб. кафедры «Механика»

ВПИ (филиала) ВолгГТУ, Россия, г. Волжский E-mail: mechanic@volpi.ru

Аннотация. Представлены алгоритмы и математические модели для определения упругой деформации подшипниковых колец при закреплении и механической обработке. Для определения упругих деформаций при изгибе кольца используется теория стержней малой кривизны. Максимальная упругая деформация кольца при изгибе определяется методом Мора. Статическая неопределимость кольца раскрывается методом сил. Сопоставляются аналитические решения с результатами расчетов МКЭ и экспериментальными исследованиями. Анализ формы поверхности нежестких колец сделан на примере наружных колец конического однорядного роликоподшипника.

Определяются условия обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника, учитывающие осевую деформацию кольца под действием магнитного поля станка и радиальной составляющей силы резания.

Ключевые слова: кольцо подшипника, упругая деформация, механическая обработка.

При механической обработке нежестких деталей необходимо учитывать упругие деформации, возникающие от усилий закрепления и резания. Отклонения формы (отклонения от плоскостности, круглости,

цилиндричности) деталей от упругой деформации во многих случаях значительно превышают погрешности, вызванные биением шпинделей, неточностью установки и другими факторами. Опыт изготовления колец прецизионных подшипников и колец подшипников малой жёсткости показывает, что современная технология шлифовальной обработки не может разрабатываться без учета жёсткости деталей и упругой деформации в процессе обработки [1].

Осевые упругие деформации колец при обработке торцовых поверхностей обусловлены наличием начальных отклонений от плоскостности и изогнутости торцов после термообработки или механической обработки поверхностей колец. Осевые упругие деформации существенно усложняют процесс шлифования, так как под действием магнитного поля стола станка и силы резания кольцо получает упругую деформацию. После шлифования и снятия магнитного поля в результате упругих деформаций определенные отклонения от плоскостности возвращаются. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время обработки и стоимость операции [1]. При закреплении кольца в кулачковых патронах и растачивании внутренней или наружной поверхности под действием усилий зажима и резания появляются радиальные деформации. Поверхность обрабатывается в деформированном состоянии и после снятия усилий зажима поверхность приобретает отклонение от круглости и цилиндричности. Для обеспечения требуемых допусков круглости, цилиндричности необходимы дополнительные операции.

Управление величиной осевой и радиальной упругой деформации позволит уменьшить время и стоимость операции при гарантированном обеспечении геометрической точности детали.

Цели исследований: исследование влияния упругих деформаций на отклонение от формы колец; разработка математических моделей и алгоритмов для определения упругих деформаций под действием усилий

зажимных устройств и усилий резания; расчёт упругих деформаций МКЭ; экспериментальные исследования упругих деформаций; определение условий, обеспечивающих получение заданного допуска отклонения от формы с учетом упругой деформации при закреплении и механической обработке; разработка рекомендаций по совершенствованию технологического процесса.

Исследование влияния осевых упругих деформаций от усилий зажима и резания на отклонение от плоскостности при плоском шлифовании торцовых поверхностей на станке с круглым магнитным столом проведены для наружных колец крупногабаритного конического однорядного роликоподшипника У-7866А.01, 1077756.01 [2-4].

Исследование влияния радиальных упругих деформаций от усилий зажима на погрешности формы колец при механической обработке в кулачковом патроне проведены для наружного кольца роликоподшипника У-2007122А.01 [5].

Для математического моделирования упругих деформаций кольца используется теория стержней малой кривизны, максимальная упругая деформация кольца определяется методом Мора, статическая неопределимость кольца раскрывается методом сил [2-5].

Разработанные математические модели и алгоритмы для определения упругих деформаций колец основаны на теории изгиба стержней малой кривизны, максимальные деформации кольца (перемещения) определяются методом Мора, статическая неопределимость раскрывается методом сил.

Контактная деформацию реальных поверхностей определяется методом Н. Б. Дёмкина. Экспериментальные исследования деформаций колец, расчеты методом конечных элементов согласуются с теоретическими расчётами для разработанных математических моделей.

Определены условия, обеспечивающие получение заданных допусков плоскостности, круглости, цилиндричности с учетом упругой деформации при закреплении и механической обработке колец [2-5].

Исходя из проведенных исследований, разработан способ устранения изогнутости торцов колец шлифованием, при котором шлифование первого торца производится с радиальной составляющей силы резания, обеспечивающей осевую деформацию (максимальный прогиб) меньше допуска плоскостности торцов [6].

Для исследованных колец разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса.

Список литературы

1. Исследование процессов шлифования внутренних и наружных конусов деталей класса колец: монография / Б.И. Коротков, С.Б. Коротков, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград: РПК "Политехник".- 2007. - 133 с.

2. Влияние осевых деформаций на отклонение от плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника при шлифовании / В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, С.В. Орлов, А.В. Саразов // Известия вузов. Машиностроение. - 2015. - № 9. - С. 68-74.

3. Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Svetlichnaya V.B. The determination of axial displacements during bearing end face grinding//Journal of Machinery Manufacture and Reliability, Volume 39, Issue 3, April 2010, Pages 157-160.

4. Оптимальные условия шлифования торцевых поверхностей колец крупногабаритных подшипников / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, С. В. Орлов, А. В. Саразов //Вестник машиностроения. 2015.- № 4. - С. 60 –66.

5. Kopetskii A.A, Nosenko V.A., Tyshkevich V.N. Influence of Shift of Clamping Forces on Elastic Deformations of the Bearing Ring in a Jaw Gripper//Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2014, Volume 43, No. 1, pp. 55-59.

6. Пат. 2370354 Российская Федерация, МПК7 В 24 В 7/04. Способ устранения изогнутости торцов деталей класса колец шлифованием / Орлов С. В., Тышкевич В. Н., Коротков Б. И., Носенко В. А.; заявитель и

V. A. Nosenko, V. N. Tyshkevich, A.V. Sarazov , S. V. Orlov

Volzhsky Polytechnical Institute (branch) of the Volgograd State Technical
University,

Volzhsky, Russia. E-mail: nosenko@volpi.ru

Abstract. Algorithms and mathematical models for determination of elastic deformation of bearings rings when fixing and machining are presented. The theory of small curvature bars is used for determination of elastic deformations at the bending of ring. Maximal elastic deformation of rings at the bending of ring is determined the method of More. The statistical uncertainty is expanded with the method of forces. Analytical decisions are compared with the results of calculations of FEM and experimental researches. The shape of the surfaces of the non-rigid rings was analyzed with the example of the outer rings of a conical single-row roller bearing.

The terms of providing of the required flatness tolerance of end surface are determined for bearing ring, taking into account axial deformation of the ring under the magnetic field effect on the machine table and the radial component of the grinding force.

Keywords: bearing ring, elastic deformations, machining

MULTI-GRAINED ABRASIVE DRILL BIT

Ruslan Yurievich Melentiev, master, PhD student

Odessa National Polytechnic University (Ukraine)

E-mail: melentiev@gmail.com

Annotation. New design of abrasive drills were presented in the work. Multi-graininess is a technological solution, which combines roughing and finishing in a single tool motion. New models have eliminate partially the contradiction of performance / quality due to the simultaneous reduction of the cutting forces, treatment temperature, surface roughness, hole edge defects and increase tool life.

Keywords: new design, multi-grained, abrasive drill, cutting force reducing, delamination.

Введение. В настоящее время наблюдается стремительный рост применения неметаллических материалов таких как полимерные композиты, керамика, ферриты, ситаллы и др. Это приводит к необходимости усовершенствования методов обработки этих материалов, которые в значительной степени усложнены их специфическими физическими и механическими свойствами. Формообразование отверстий в полимерных композиционных материалах (ПКМ) является наиболее трудоемкой операцией в их обработке. Среди известных методов формообразования отверстий: электроискровая обработка не показала высокой эффективности, лазерная и электрохимическая обработка и вовсе не применима к данному классу материалов. Таким образом, традиционное механическое сверление все еще сохраняет первенство в решении данного вопроса.

Цели. Для повышения эффективности сверления неметаллических материалов абразивным инструментом были заложены следующие цели, задачи и методы их достижения (рис.1).



Рисунок 1. Цели, задачи и методы создания нового инструмента

Основная часть. Новые конструкции получены путем изменения геометрии режущей части, а также путем совмещения крупной и мелкой абразивных фракций. В таблице 1 представлены три стержневые двухслойные сверла (СДС) и три полые двухслойные сверла (ПДС), слева и справа, соответственно. Конструкции представленных моделей состоят из металлического корпуса 1 и абразивной коронки 2, которая имеет два или более абразивных слоёв (в таблице 1, для примера, приведены только двухслойные конструкции), отличающихся размером фракции абразивного элемента. Крупнозернистый слой 3 всегда расположен ближе к оси вращения сверла, мелкозернистый слой 4 – дальше. Дренажные каналы, пазы и перфорация 5, а также окно для вывода керна 6.

Таблица 1. Конструкции новых алмазных сверл.

	Стержневые двухслойные сверла (СДС)			Полые двухслойные сверла (ПДС)		
	а) Коническое СДС [1]	б) Архимедово СДС [2]	в) Клиновидное СДС [3]	г) Кольцевое ПДС [4]	д) Открытое ПДС ¹	ж) Граненное ПДС ²
3-мерная иллюстрация						
Осевой разрез						
Базовый						

* Компоненты:

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| 1. Стержень (трубка); | 4. Мелкозерн. слой |
| 2. Абразивная часть; | 5. Каналы (перфорация); |
| 3. Крупнозерн. слой; | 6. Выходное окно; |

¹ Патент в процессе публикации. Регистрационный номер u201509355.

² Патент в процессе публикации. Регистрационный номер u201509758.

Благодаря многослойному исполнению абразивной части предложенных конструкций, процесс сверления этим инструментом можно разделить на две стадии: 1) резание крупнозернистым слоем 3 и 2) резание мелкозернистым слоем 4. Известно [5], что крупные алмазные зерна более продуктивны в процессе сверления, поэтому основной объем припуска удаляется за счет крупнозернистого слоя, чем достигаются низкие усилия резания, что в свою очередь, согласно исследованиям [6-8], ведет к

снижению величины отслоения и других дефектов кромки отверстия. Кроме того, применение крупной зернистости снижает степень диспергирования стружки, что отражается на энергозатратах и как следствие на теплонапряженности процесса резания, что особо актуально при обработке материалов с низкой теплостойкостью, таких как полимерные композиционные материалы. Также известно [9], что маленькое зерно обеспечивает создание низкой шероховатости поверхности, поэтому поверхностно образующий припуск снимается мелкозернистым слоем. Таким образом в одном движении инструмента объединяется черновая и чистовая обработка: операции сверления и рассверливания. Дренажные каналы, пазы и перфорация 5 создают прерывистые условия резания, что снижает температуру в зоне резания [11,12], способствуют выводу шлама и создают возможность подвода СОЖ в зону резания [13]. Стружка мигрирует по конической поверхности пока не попадет в дренажный канал, после вымывается из канала за счет высокого давления подачи СОЖ, что снижает засорение режущей поверхности инструмента и поддерживает механизм вскрытия новых режущих вершин.

Среди указанного стоит отметить отдельные преимущества каждой конструкции (таблица 1):

а) Коническое СДС назначается для сверления тонких конструкций, где нет возможности использовать опорную плиту.

б) Архимедово СДС обеспечивает преимущество при сверлении глубоких отверстий.

в) Перовое СДС рекомендуется для сверления материалов с низкой теплостойкостью.

г) Кольцевое ПДС эффективно заменяет обычное кольцевое сверло в любых условиях обработки.

д) Перфорированное ПДС обеспечивает стабильное осевое усилие в процессе многократного сверления за счет устранения проблемы блокирования керна и рекомендуется для обработки упругих материалов.

ж) Граненое сверло обеспечивает точность линейных размеров отверстия (точность диаметра, глубина сверления) в материалах с высокими упругими характеристиками, например, в углепластиках.

Приведенные конструкции могут быть выполнены методами гальванопластики, порошковой металлургии, плазменного напыления, ионного-плазменного осаждения и др. Алмазная часть СДС фиксируется на специальный торец металлической базы или устанавливается как показано в иллюстрациях таблицы 1. Соотношение толщины слоев 3 и 4 зависит от диаметра и типа сверла, например, 10/1 для СДС и 20/1 для ПДС диаметром 5 мм. Углы, наклоны и эксцентриситет СДС могут быть рассчитаны в зависимости от характеристик заготовки и критических сил резания. Ширина дренажных каналов, диаметр перфорации и размеры пустот могут быть рассчитаны по известным тепловым уравнениям с учетом микроцикла нагрев/охлаждение [12,13].

Закключение. Эмпирические данные полученные автором, а также взятые из других экспериментальных источников позволяют установить следующие преимущества предложенного инструмента:

- Снижение сил резания;
- Снижение температуры в зоне резания;
- Повышение стойкости инструмента;
- Повышения качества поверхности;
- Повышения точности диаметра отверстия;
- Снижение дефектов кромки отверстия;

Новые конструкции сверл также являются эффективным решением вопроса сверления тонкостенных деталей, глубокого сверления, обработкой материалов с низкой теплостойкостью и высокими упругими характеристиками.

Выражение благодарности. Автор признателен профессору кафедры «Технологии машиностроения» Одесского Национального Политехнического

Университета (ОНПУ) д.т.н. Ларшину Василию Петровичу за консультацию в оформлении авторского права на изобретения.

Литература:

1. Пат. 88720 Украина, МПК В28D 1/12. Абразивное коническое сверло / Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Мелентьев Р.Ю.; заявители и патентовладельцы Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Мелентьев Р.Ю. — № u201313139; заявл. 11.11.2013; опубл. 25.03.2014; Бюл. № 6.
2. Пат. 92358 Украина, МПК В28D 1/12, В24D 5/00. Абразивное Архимедовое сверло / Мелентьев Р.Ю.; заявитель и патентовладелец Мелентьев Р.Ю. — № u201402925; заявл. 24.03.2014; опубл. 11.08.2014; Бюл. № 15.
3. Пат. 92485 Украина, МПК В28D 5/00, В28D 1/12. Абразивное клиновидное сверло / Мелентьев Р.Ю.; заявитель та патентовладелец Мелентьев Р.Ю. — № u201314191; заявл. 05.12.2013; опубл. 26.08.2014; Бюл. № 16.
4. Пат. 86318 Украина, МПК В24D 5/00, В28D 1/12. Абразивное кольцевое сверло / Мелентьев Р.Ю.; заявитель и патентовладельцы Лищенко Н.В., Мелентьев Р.Ю., Ларшин В.П. — № u201308214; заявл. 01.07.2013; опубл. 25.12.2013; Бюл. № 24.
5. W. L. Cong, Z. J. Pei, X. Sun, C. L. Zhang, Rotary ultrasonic machining of CFRP: A mechanistic predictive model for cutting force, *Ultrasonics* 54 (2014) 663 – 675.
6. R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Composites: Part A* 31 (2000) 1107 – 1115.
7. J. P. Davim, P. Reis, Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study, *Materials and Design* 24 (2003) 315 – 324.
8. J. P. Davim, P. Reis, Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, *Composite Structures* 59 (2003) 481 – 487.
9. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. - 176 с.
10. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности / В. А. Сипайлов. — М.: Машиностроение, 1978 – 167 с.
11. Лищенко, Н.В. Определение температуры прерывистого шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.В. Якимов / Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2012. — Вип. 2(39). — С. 80 — 85.
12. Ларшин, В.П. Температура прерывистого шлифования без принудительного охлаждения / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Наукові нотатки. — 2013. — Вип. 41, Ч. 1. — С. 154 — 159.

SELF-SHARPENED PROFILE OF THE CORE DRILL

Ruslan Yurievich Melentiev, master, PhD student

Odessa National Polytechnic University (Ukraine)

E-mail: melentiev@gmail.com

Annotation. In the study was considered a tool wear of the core drill and a possibility of its prevention. It was proposed a technological solution of a multi-layer tool, which support a specified profile geometry of the drill bit cutting part without repoint. Indicated increases productivity and reduces delamination at the hole edge. Numerical simulation based on the empirical data allowed to determine the temperature reduction on the machined hole surface during drilling process.

Keywords: Self-sharpened, core drill, abrasive drill, tool life, delamination.

Введение. Кольцевые сверла — это наиболее распространенная конструкция алмазного инструмента для обработки отверстий. Основным преимуществом подобной конструкции является наличие полости, как в рабочей части, так и в корпусе инструмента. При сверлении образуется керн, диаметр которого равен диаметру отверстия, образующего полость. Работающее сверло можно представить как кольцевой круг, вышлифовывающий отверстие своей торцовой поверхностью. Весьма важным фактором, определяющим эффективность работы алмазного сверла является макрогеометрия алмазоносной рабочей части сверла [1].

Состояние вопроса. Типичная геометрия и основные параметры режущей части кольцевого сверла приведена на рис. 1, а: h - высота алмазоносного слоя (мм); b - ширина алмазоносного слоя (мм); I_n - наружное поднутрение (расстояние от наружной цилиндрической поверхности до корпуса) (мм); $I_{вн}$ - внутреннее поднутрение (расстояние от внутренней цилиндрической поверхности до корпуса) (мм). D_n и $d_{вн}$ — наружный и внутренний диаметры, соответственно.

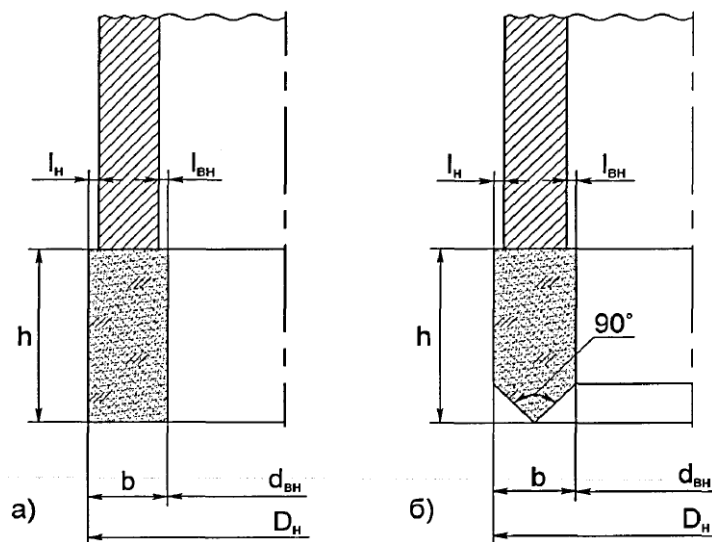
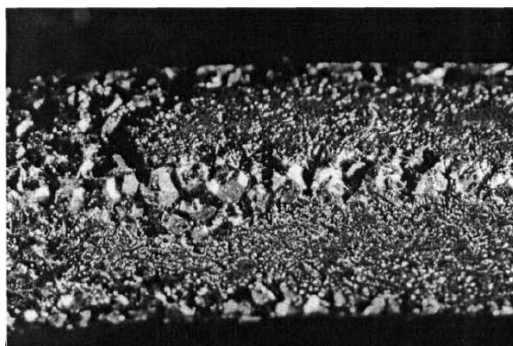
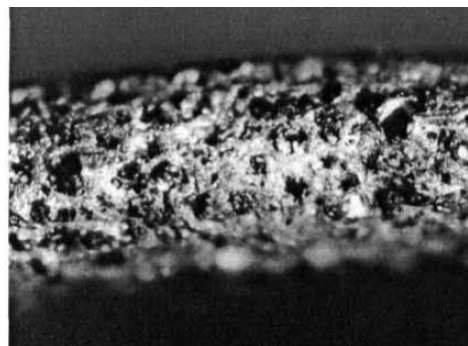


Рисунок 1. Геометрия алмазных кольцевых сверл [2]: а) с плоской рабочей торцевой поверхностью; б) с угловой рабочей торцевой поверхностью;

В процессе сверления цилиндрические поверхности являются калибрующими в то время, когда торцовая поверхность абразивной части сверла выполняет основную работу резания. Результаты испытаний [3] показали, что производительность обработки сверлом с специально оправленным торцом под углом 90° (рис.1, б), по сравнению со сверлом с плоским торцом, увеличивается в 1,3 раза, а величина сколов на входе и выходе снижается на 30-40%, так как алмазные зерна на наклонных поверхностях врезаются в обрабатываемый материал постепенно. Тем не менее заданная оправка изнашивается уже к 80-му отверстию. На рис. 2 приведена микрофотография поверхности сверла с углом в плане 90° после правки и после 80 просверленных отверстий.



а



б

Рисунок 2. Микрофотографии поверхности сверл с угловой рабочей поверхностью (увеличение $80\times$) [3]: а) после изготовления; б) после обработки 80 отверстий;

Кроме указанного, абразивная обработка отличается высокой степенью диспергирования стружки, приводящей к повышенным энергозатратам и как следствие к высокому уровню теплонапряженности процесса сверления, что недопустимо при обработке ряда материалов с низкой теплостойкостью, таких как полимерные композиционные материалы. Так при достижении $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, начинается активная термодеструкция полимерного связующего [4,5], в результате чего возникает технологический дефект «прижёт» обработанной поверхности и кромок отверстия [6].

Цель исследования состояла в повышении эффективности процесса абразивного сверления путем повышения стойкости инструмента, а также снижения осевого усилия резания и температуры возникающей на обработанной поверхности за счет модернизации профиля рабочей поверхности сверла.

Основная часть. Повышение стойкости инструмента достигается за счет выполнения абразивной части в несколько слоев с различной износостойкостью [7]. На рис. 3, а и б. Показана схема выполнения торца с углом 2α в 90° . Слой 2а выполнен на основе более твердой связки по сравнению с слоями 2б (например, в связке М1 и М). Такое выполнение коронки обеспечивает повышенную стойкостью центрального слоя и относительно ускоренный износ периферийных слоев, чем и обеспечивается постоянное поддержание заданной геометрии торца. В свою очередь сохранение угла на торце способствует удержанию низкого уровня осевого усилия резания по сравнению с плоским торцом.

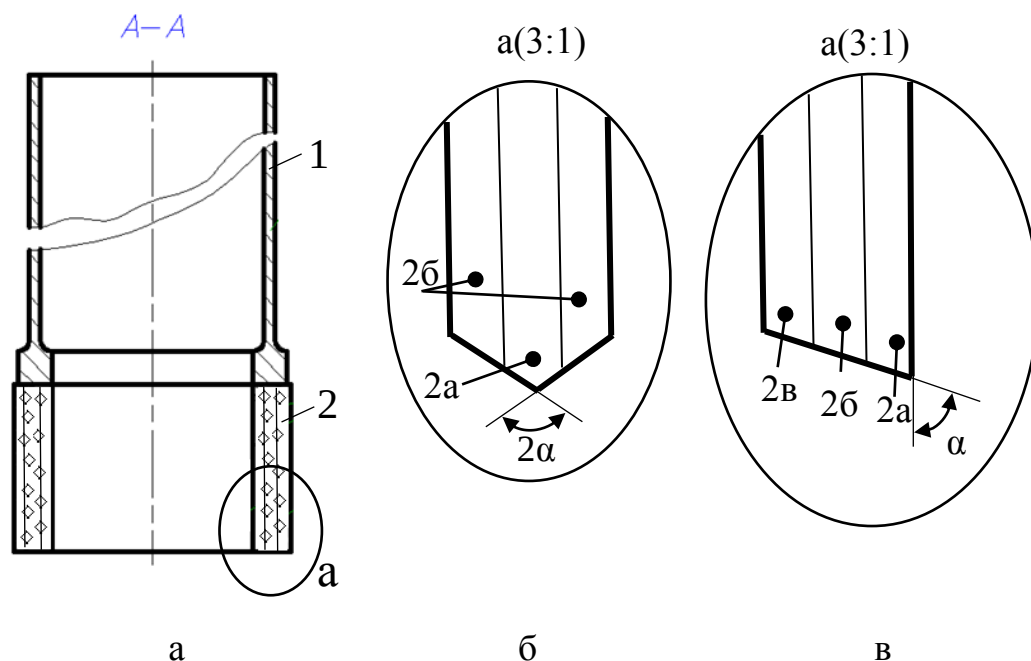


Рис. 3. Схема выполнения торца рабочей части абразивного инструмента (кольцевое сверло в разрезе (а); торец с углом 90° (б); торец с наклоном 30° (в)) [7].

На рис. 3, в, приведена многослойная модель рабочей части сверла с наклонным профилем. Слои 2а, 2б и 2в выполняются с понижением износостойкости, соответственно, что обеспечивает поддержание угла наклона на торце. Кроме снижения осевого усилия, данная геометрия приводит к снижению температуры на обрабатываемой поверхности. Такой вывод получен в результате численного эксперимента, выполненного методом конечных элементов для определения теплонапряженности процесса кольцевого сверления. Моделирование выполнялось на основе эмпирических данных взятых из экспериментального исследования автором алмазного сверления углепластика кольцевым сверлом [8]. Условия и допущения, принятые в симуляция, а также математический аппарат программного комплекса в рамках краткого доклада не приводится. Результаты моделирования отображены на рис. 4.

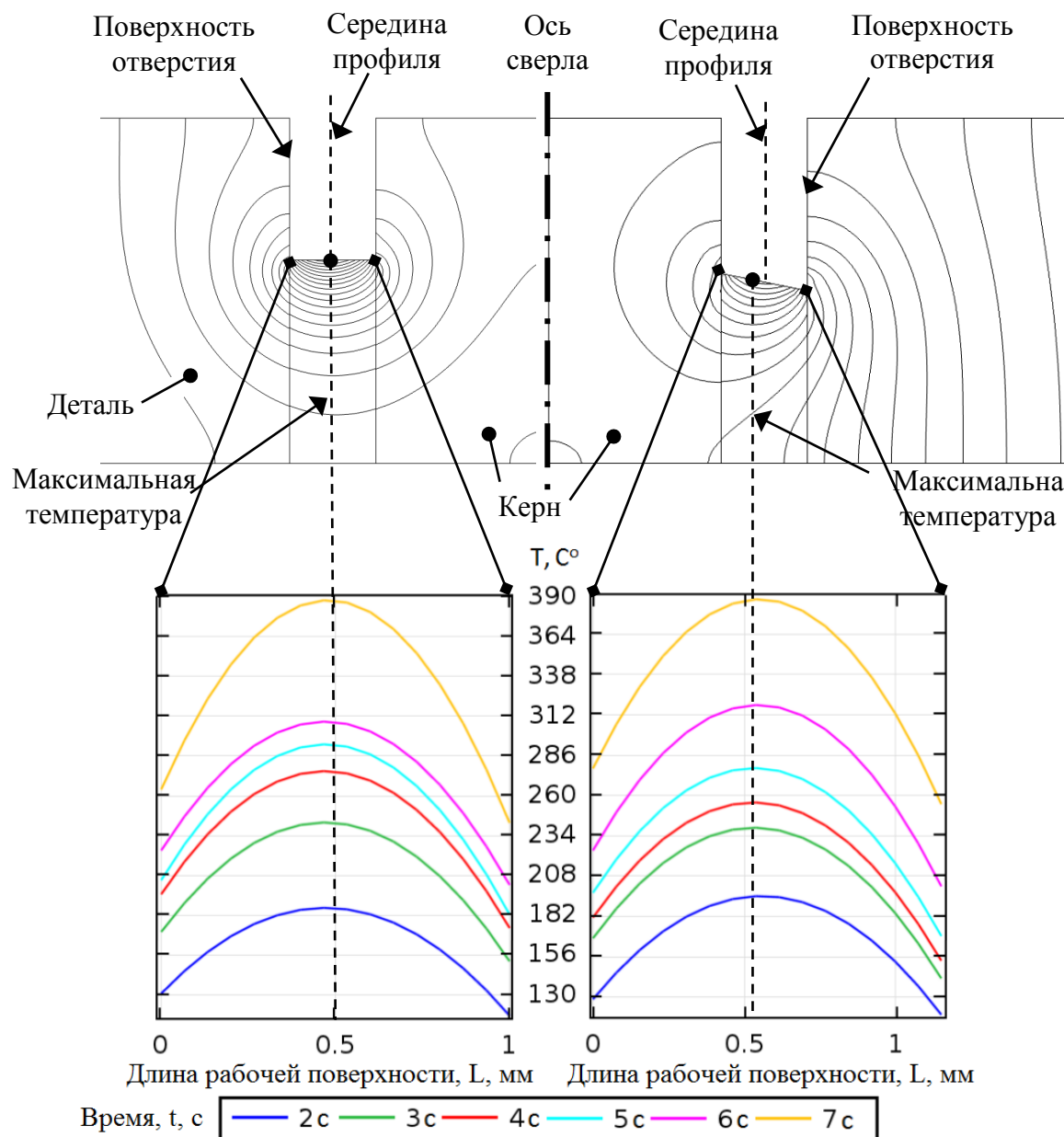


Рисунок 4. Изотермический анализ (вверху) и распределение температуры в зоне резания (внизу) относительно времени по длине рабочей поверхности плоского торца (слева) и наклоненного торца (справа).

Изотермический анализ показывает, что максимальная температура в зоне резания при плоском профиле рабочей части расположена посередине срезаемого припуска. Тем не менее обрабатываемая поверхность нагревается сильнее поверхности керна за счет большей скорости резания на внешней кромке торца. С применением наклоненного профиля наблюдается изометрическая асимметрия. Точка максимальной температуры смещается к

внутренней кромке торца, тем самым понижая температуру на обрабатываемой поверхности отверстия. На различных режимах сверления с применением наклонного профиля с углом $\alpha = 30^\circ$ температура на обрабатываемой поверхности около выходной кромки снижается до 34% по сравнению с плоским профилем.

Заключение. Предложенные конструкции обладают свойством самооформления геометрии рабочей поверхности абразивного кольцевого сверла, что позволяет сохранять осевое усилие резания на одном уровне, не прибегая к повторной правке инструмента, а также существенно снижать температуру на обрабатываемой поверхности по сравнению с обработкой известным кольцевым сверлом.

Литература:

1. Дударев, А.С. Конструкции сверл и фрез для алмазно-абразивной обработки стеклопластиков и углепластиков / А.С. Дударев // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2012. — Вып. 1. — С. 361 — 370.
2. Балыков А.В., Цесарский А.А. Алмазное сверление отверстий. М, Журнал «Обмен опытом в радиопромышленности», вып.8, 1976, с. 31-36.
3. Балыков А.В., Кирова Н.Ф., Цесарский А.А. Работоспособность алмазных сверл, изготовленных из различных марок алмазного сырья. Журнал «Алмазы и сверхтвёрдые материалы», вып. 4, М.: НИИМАШ, 1975, с. 7-10.
4. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. — 176 с.
5. Дрожжин, В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс : дис. д-ра техн. наук / В. И. Дрожжин. — Харьков, 1982. — 32 с.
6. Мелентьев, Р.Ю. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов / Р.Ю. Мелентьев, В.В. Натальчишин // 3б. наук. праць НУК. — 2013. — № 4. — С. 30 — 34.

7. Мелентьев Р. Ю. Абразивное самозатачиваемое кольцевое сверло. Патент Украины: № U 2016 01610.

8. R. Melentiev, P. C. Priarone, M. Robiglio, L. Settineri. Effects of tool geometry and process parameters on delamination in CFRP drilling. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI). Procedia CIRP (2016).

УДК 621.914.22:62-408.2

А.Р. Маслов

**Влияние антифрикционных алмазоподобных (DLC) покрытий на
надежность процесса фрезерования без СОЖ авиационных
алюминиевых сплавов**

Андрей Руффович Маслов, д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «МГТУ
«СТАНКИН», Россия, Москва, vestnik@stankin.ru

Приведены результаты исследования влияния антифрикционного покрытия, полученного методом формирования углеродных алмазоподобных пленок, на ресурс работы концевых твердосплавных фрез. Сравнивалась работоспособность фрез без износостойкого покрытия и фрез с покрытием DLC с целью внести коррективы в технологию нанесения покрытия DLC и уточнить возможности использования автоматизированного диагностического комплекса. Показано, что фрезы с покрытием DLC отличаются не только большей износостойкостью и меньшей склонностью к налипанию алюминия, но и являются более предпочтительным при использовании станков с адаптивной системой управления вследствие замедления процессов, предшествующих поломке инструмента.

Ключевые слова: фрезерование алюминиевых сплавов, покрытие DLC, работоспособность, адаптивное управление

Процесс обработки алюминиевых сплавов концевыми фрезами имеет свою специфику и требует инструмента со специализированной геометрией, обеспечивающей оптимальные углы резания и беспрепятственный отвод стружки [1]. Особенность процесса состоит также в том, что при обработке

алюминиевых сплавов высокая частота вращения шпинделя обычно сочетается с большой глубиной резания, что приводит к поломке твердосплавного инструмента из-за серьезных вибраций. Поэтому для каждого перехода приходится подбирать интервал частот вращения, при котором резание происходит стабильно.

Подача в большом количестве СОЖ в виде углеродсодержащей жидкости в зону резания, так же как и смазка масляным или спиртовым туманом неэффективны, ввиду того, что при высоких оборотах шпинделя смазка попадает на режущие кромки эпизодически. Возникают резкие перепады температуры, вызывающие микроскопические трещины на режущих частях, что снижает прочность инструмента и приводит к его поломке. Поэтому задачей является сокращение объемов использования СОЖ, что дополнительно стимулируется высоким уровнем затрат, связанных с ее использованием.

Одним из решений этой задачи является нанесение антифрикционных алмазоподобных покрытий (DLC) препятствующих налипанию частиц алюминия на рабочую часть инструмента. DLC обеспечивает коэффициент трения (0.10), высокую микротвердость (180 ГПа) и отсутствие адгезионного схватывания [2].

В МГТУ «СТАНКИН» осуществлены сравнительные испытания концевых твердосплавных фрез диаметром 8 мм с DLC и без покрытия без применения СОЖ. Критерием сравнения фрез являлась поломка фрезы при обеспечении производительности съема обрабатываемого материала с заготовки сечением 200x300x40 из сплава Д16Т на обрабатывающем центре DMC 635V ecoline. при следующих параметрах: частота вращения $n = 10^4$ мин⁻¹; скорость резания $V_c = 250$ м/мин; скорость подачи $V_k = 2160$ мм/мин; подача на зуб $t_z = 0,037$ мм/зуб; ширина фрезерования $B = 4$ мм; глубина фрезерования $h = 15$ мм. Фрезы закрепляли в цанговом патроне с вылетом 30 мм с биением 0,005 мм.

На первом этапе выяснилось, что объем материала, удаленного фрезой без покрытия перед ее поломкой на пути фрезерования 1750 мм – 105 см³; фрезой с DLC - на пути фрезерования 2230 мм – 133,8 см³.

Для дальнейшей оценки производительности при резании без подвода СОЖ уменьшили подачу на зуб до $t_z = 0,035$ мм/зуб, вылет фрезы - до 25 мм. Выполняли фрезерование пазов шириной 8 мм и глубиной 5,6 мм в листе из сплава Д16Т с размерами 550x280 мм по узкой стороне с шагом 13 мм.

Фреза без покрытия прошла 8 пазов с путем фрезерования 2,24 м. Фрезой с покрытием DLC было пройдено полностью 15 пазов с путем фрезерования 4,2 м, несмотря на то, что радиус округления режущей кромки $\rho = 16$ мкм, возникший из-за нанесения покрытия, был больше, чем у фрезы без покрытия (10 мкм).

Налипание обрабатываемого материала на рабочие поверхности фрез оценивали на стереомикроскопе SteREO Discovery V12. Изменение геометрии режущей части испытываемых фрез проводилось путем измерения радиуса округления режущих кромок на системе MicroCAD с последующим сравнением с величиной начального радиуса, являющегося одним из факторов процесса (рис. 1).

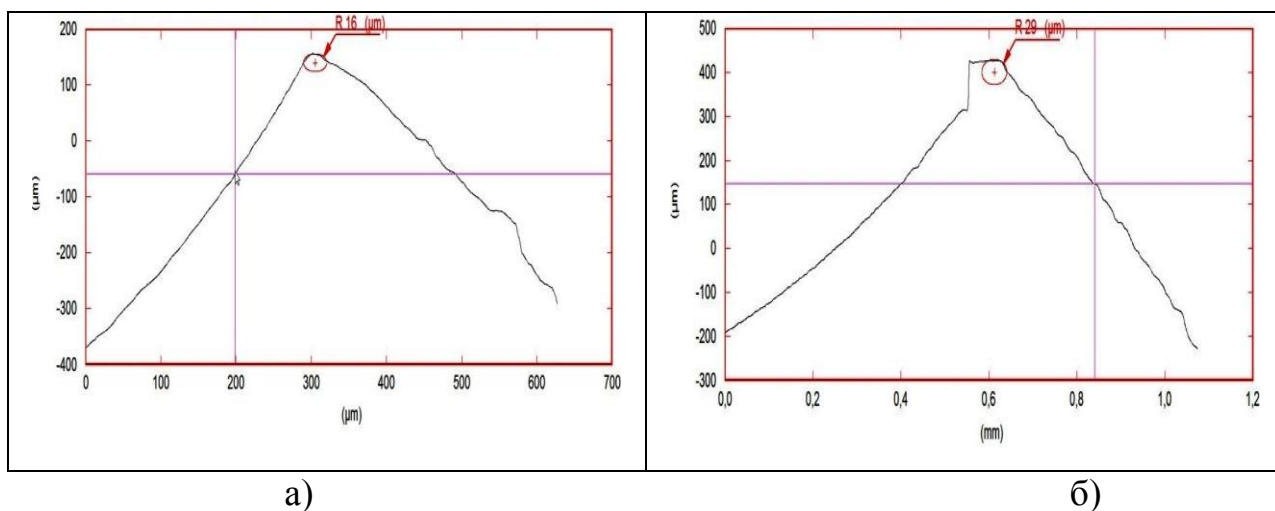


Рис. 1. Радиус округления режущей кромки зуба фрезы после обработки паза длиной 2 м: а) с DLC; б) без покрытия

В процессе работы фрезы с DLC увеличение радиуса округления режущей кромки не наблюдалось, что свидетельствует о высоком сопротивлении изнашиванию. Фреза без покрытия на том же пути резания показала значительное увеличение радиуса r с 10 до 29 мкм в основном за счет налипания обрабатываемого материала на режущую кромку.

Критерием отказа фрезы считали появление недопустимых вибраций, поскольку при обработке алюминия необходимо учитывать ограничение, накладываемое гармоническими характеристиками шпинделя и инструмента как системы. Характеристики вибраций измеряли с помощью автоматизированной диагностической системы [1], в которой реализованы мониторинг вибрации в режиме реального времени и обеспечение записи данных с пьезоэлектрических вибродатчиков.

Один пьезоэлектрический датчик был ориентирован в направлении подачи (ось X), другой – в вертикальном направлении (ось Z). Процесс поломки отображался в виде всплеска сигнала вибраций по обеим осям, так как при развитии налипания усиливаются ударные процессы в зоне резания, которые и вызывают рост амплитуд вибраций во всем частотном диапазоне. На рис. 2 показана запись сигналов вибраций при резании фрезой с покрытием DLC.

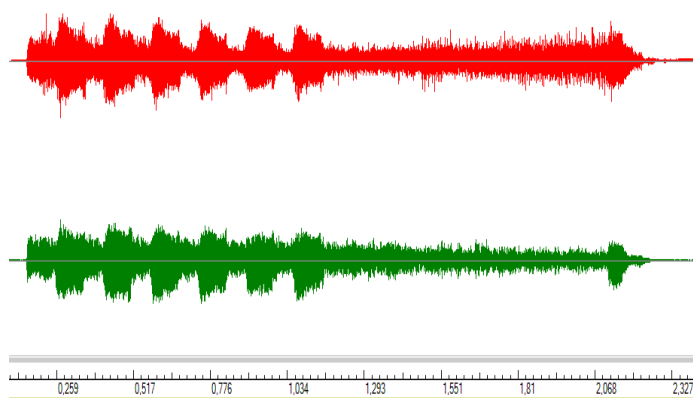


Рис. 2. Сигнал вибраций при резании фрезой с DLC: верхняя запись – ось X; нижняя запись – ось Z. Время резания 2 с.

На начальном этапе на записи (см. рис. 2) наблюдаются периоды возникновения очагов налипания, что выражается в усилении низкочастотных вибраций. В период возникновения таких очагов резко увеличивается амплитуда колебаний на зубцовой частоте (частоте входа зуба в обрабатываемый материал). Однако налипы стружки не задерживаются на режущей части фрезы. К середине прохода после приработки фрезы налипы прекращаются.

Обнаружено, что при работе фрезой без покрытия возникают повышенные вибрации, особенно в области низких частот. На зубцовой частоте 500 Гц амплитуда сигнала при резании фрезой без покрытия почти в четыре раза превышает амплитуду, полученную при работе фрезой с покрытием.

Данные о мгновенных значениях сил резания получили, обрабатывая кромку листа из сплава Д16Т толщиной 8 мм. Каждой фрезой выполняли по 40 проходов, что равно пути резания 11,2 м и объему удаленного материала 179,2 см³, что соответствует минутной производительности предыдущего эксперимента.

Измерительные сигналы сил и моментов были получены с помощью пьезоэлектрического динамометра Kistler 9253B23.

Выявлено, что сила резания по осям X и Z увеличивается от первого к 40-му проходу для фрезы с DLC уменьшается для фрез без покрытия. Это свидетельствует о том, что инструмент без покрытия за счет колебаний, возникающих из-за налипания обрабатываемого материала, выходит из зоны стабильного резания и начинает деформировать, а не резать материал.

Заключение

1. Нанесение антифрикционного алмазоподобного покрытия (DLC), снижает трение между инструментом и обрабатываемым материалом и препятствует интенсивному налипанию материала заготовки, что позволяет почти в два раза увеличить производительность съема материала заготовок

из алюминиевых авиационных сплавов концевыми твердосплавными фрезами по сравнению с фрезами без покрытия.

2. Фрезы с DLC отличаются не только большей производительностью из-за меньшей склонности к налипанию алюминия, но и являются более предпочтительным при использовании станков с адаптивной системой управления, так как процессы, предшествующие поломке инструмента развиваются медленнее, чем у фрез без покрытия.

Библиографический список

1. Maslov A.R., Zhigalov A. N. A method of increasing hard-alloy wear resistance via aerodynamic impact //Journal of Friction and Wear, 2014, vol. 35, №5, pp. 421-425 .

2. Жигалов А.Н., Маслов А.Р., Шатуров Г.Ф. Повышение эффективности фрезерования путем совершенствования структуры режущих твердых сплавов// Вестник машиностроения, № 8/2015 с. 20-23

3. Маслов А.Р. Мониторинг процессов автоматизированной лезвийной обработки заготовок//Труды межд. науч.-техн. конф. «Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении», С-Пб, 17-19 сентября 2014, с. 118-127

A. R. Maslov, MSTU “STANKIN”

Effect of antifriction diamond-like coatings (DLC) on the process reliability of milling without coolant of aviation aluminum alloys

Results of research of influence of anti-friction coatings, obtained by the method of forming the DLC on the life of carbide end mills. Compared the efficiency of cutters without DLC and with DLC with a view to adjusting the coating technology and to clarify the possibilities of using automated diagnostic complex. It is shown that the end mills with DLC differ not only greater durability and less prone to adhesion of aluminum, but are preferable when using machines with adaptive control system due to slowing processes prior to the breakage of the tool.

Keywords: milling of aluminum alloys, DLC, efficiency, adaptive management

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ ТРУБ АВИАЦИОННЫХ ХВОСТОВЫХ ТРАНСМИССИЙ ВЕРТОЛЕТОВ

Владимир Федорович Макаров, доктор технических наук, профессор
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, Пермь, E-mail: makarovv@pstu.ru

Вадим Юрьевич Угринов, кандидат технических наук, Главный
технолог АО «Редуктор-ПМ», Россия, Пермь, E-mail: ugrinov@reductor-pm.com

Александр Сергеевич Горбунов, аспирант, ведущий специалист АО
«Редуктор-ПМ», Россия, Пермь, E-mail: gorbunov-as@reductor-pm.com

Наталья Андреевна Ворожцова, магистр, инженер-технолог АО
«Редуктор-ПМ», Россия, Пермь, E-mail: vorozhtcova@reductor-pm.com, 8912-
980-59-22

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы автоматизации назначения оптимальных технологических режимов ротационной вытяжки труб авиационных хвостовых трансмиссий вертолетов (АХТВ). Проведены исследования остаточных напряжений методом рентгеноструктурного анализа. Получены оптимальные технологические режимы, обеспечивающие геометрическую точность, равномерное распределение остаточных напряжений и требуемые физико-механические свойства.

Ключевые слова: автоматизация, ротационная вытяжка, трубы АХТВ, остаточные напряжения, технологические режимы, математическая модель.

Трубы авиационных хвостовых трансмиссий вертолетов (АХТВ) применяются в вертолетах с одновинтовой схемой с рулевым винтом и предназначены для передачи крутящего момента от главного редуктора к хвостовому (рулевому) винту. Поэтому трубы АХТВ являются особо ответственными деталями, к которым предъявляются высокие требования к

геометрическим и механическим свойствам, обеспечивающих надежность полетов.

Одним из эффективных способов повышения механических свойств деталей из трубных заготовок является процесс пластической деформации методом ротационной вытяжки (рисунок 1). Ротационная вытяжка – это процесс формоизменения полых вращающихся заготовок по профилю оправки с помощью перемещающейся деформирующей нагрузки. Процесс характерен наличием локального очага деформации, образующегося в результате воздействия ролика на металл [1].

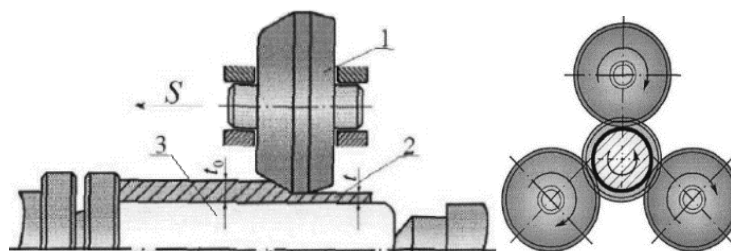


Рисунок 1. Схема обратного метода ротационной вытяжки:

1-ролик, 2-заготовка, 3-оправка

Особенность процесса ротационной вытяжки труб АХТВ заключается в последовательном изменении геометрических размеров и механических свойств заготовки. Получение труб АХТВ происходит за три-четыре этапа. После каждого раската заготовка приближается к готовой детали, путем изменения геометрических и физико-механических свойств, при этом на поверхностях остаются высокие растягивающие остаточные напряжения. Для снятия, которых после каждого раската необходим низкотемпературный отжиг.

Распределение и знак остаточных напряжений оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики. В основе возникновения остаточных напряжений лежат необратимые объемные изменения в материале. Растягивающие остаточные напряжения в сплаве Амг3М могут достигать предела текучести и прочности материала, что приводит к разрыву труб АХТВ в процессе ротационной вытяжки (рисунок 2), а высокие сжимающие остаточные напряжения приводят к гофрообразованию.



Рисунок 2. Разрыв трубы в процессе ротационной вытяжки

Роботизированный комплекс «XStress 3000» (Рисунок 3) позволяет контролировать остаточные напряжения без разрушения детали в поверхностном слое на глубине 5-15 мкм, в зависимости от материала. Так, например, для сплава Амг3М эта глубина составляет 11,5 мкм.



Рисунок 3. Роботизированный комплекс «XStress 3000»

Принципиальная схема работы представлена на рисунке 4 и выражается уравнением Вульфа-Брегга (1).

$$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \quad (1), \text{ где}$$

d — межплоскостное расстояние, θ — угол скольжения, n — порядок дифракционного максимума, λ — длина волны.

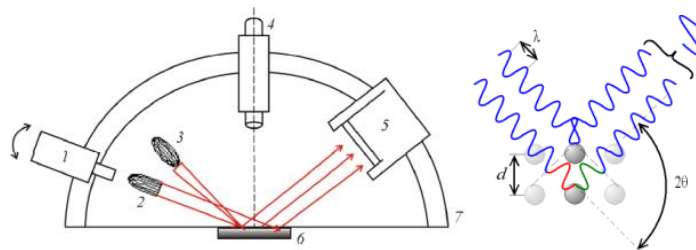


Рисунок 4. Принципиальная схема работы «XStress 3000»:

1- рентгеновская трубка, 2 – поликапиллярная полулинза, 3 – полная капиллярная линза, 4 – полупроводниковый детектор, 5 – позиционно-чувствительный детектор, 6 – исследуемый образец, 7- полукруг фокусировки.

Известно, что остаточные напряжения, формируемые в процессе ротационной вытяжки, играют важную роль и во многом определяют качество и надежность изделий в эксплуатации. Предельные возможности деформирования определяются величиной максимальных растягивающих остаточных напряжений и степенью использования ресурса пластичности [2]. На появление разрывов и окружных трещин оказывают влияние растягивающие остаточные напряжения. На появление наплывов и чешуйчатости поверхности влияют сжимающие остаточные напряжения. На появление овальности, скручивания влияет распределение остаточных напряжений.

Получены оптимальные технологические режимы, при которых обеспечивается равномерное распределение остаточных напряжений, гарантирующих стабильность процесса ротационной вытяжки и надежность работы труб АХТВ в процессе эксплуатации. Наиболее оптимальные напряжения для труб АХТВ из сплава Амг3М на последнем раскате представлены на рисунке 5.

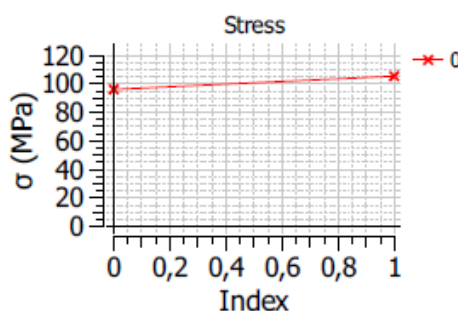


Рисунок 5. Оптимальные остаточные напряжения труб АХТВ Амг3М

Для возможности управления технологическими остаточными напряжениями в трубах различных геометрий, изготавливаемых из различных сплавов, разработана математическая модель описывающая процесс ротационной вытяжки. Схематично работа математической модели представлена на рисунке 6.



Рисунок 6. Блок-схема работы математической модели

Установленные взаимосвязи, между режимами обработки и геометрическими, физико-механическими свойствами труб АХТВ, позволяют исключить появление брака, связанного с отработкой технологических режимов, повысить качество труб АХТВ и сократить время внедрения новых изделий на операциях ротационной вытяжки.

Список литературы

1. Гредитор М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание. М.: Машиностроение, 1971. 239 с.
2. Колмогоров Г.Л. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Монография Пермь: изд-во ПНИПУ, 2012. 226 с.

Makarov V. F., «Perm National Research Polytechnic University»

Ugrinov V.Y ,«Reductor-PM»

Gorbunov A. S., «Reductor-PM»

Vorozhtsova N. A., «Reductor-PM»

Abstract. In article problems of automation of purpose of the optimum technological modes of a rotary drawing of pipes of aviation tail transmissions of helicopters are considered. Researches of residual stresses are conducted by method of the X-ray diffraction analysis. The optimum technological modes providing the geometrical accuracy, uniform distribution of residual tension and the required physicomechanical properties are received.

Keywords: automation, rotary drawing, pipes ATTH, residual stresses, technological modes, mathematical model.

УДК 621. 92

В.Ф. Макаров, С.П. Никитин., А. О. Норин, Р.А. Туранский
РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ БАЗОВЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК НА МНОГООСЕВОМ
СТАНКЕ С ЧПУ

Сведения об авторах: **Владимир Федорович Макаров** , д.т.н., проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь, e-mail: makarovv@pstu.ru , 89124915014; **Сергей Петрович Никитин**, к.т.н, доцент Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь, e-mail: perkan@perm.ru, **Александр Олегович Норин** , аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь, e-mail: norinaleksandr@mail.ru, **Роман Александрович Туранский**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь, e-mail: stomp911@ya.ru.

Аннотация. В статье приведены результаты разработки и применения специального программного обеспечения для учета отклонения литейных поверхностей

профиля пера лопаток и расчета площади проходного сечения путем введения файла коррекции в стойку ЧПУ многоосевого шлифовального станка. Для обеспечения заданного КПД авиационного двигателя необходимо изготавливать сопловые лопатки с заданной площадью проходного сечения соплового аппарата. Процесс шлифования сопловых лопаток по существующей технологии не учитывает некоторых погрешностей литейных поверхностей лопаток. Разработанное специальное программное обеспечение (СПО) позволяет собрать сборку из оцифрованных файлов лопаток, проанализировать и отредактировать площадь проходного сечения соплового аппарата. Новый способ корректирующего глубинного шлифования позволяет обрабатывать каждую лопатку с учётом индивидуального смещения её поверхностей от номинальной геометрии, тем самым, обеспечить заданную конструктором площадь проходного сечения соплового аппарата и повысить мощность авиационного двигателя на 10-15%.

Ключевые слова: проходное сечение, сопловые лопатки, глубинное шлифование, шлифовальные круги, обрабатываемые поверхности, угол поворота, количество проходов, погрешности отливок сопловых лопаток.

Особенности обработки сопловых лопаток

В связи с ростом конкуренции в авиационной отрасли и повышением требований к качеству узлов двигателя необходима стабильность обеспечения заданных параметров авиационного двигателя. Возрастает значения основных узлов, одним из таких узлов является сопловой аппарат [1], от точности изготовления которого зависит КПД авиационного двигателя [2]. Известно, что при изготовлении сопловых и рабочих лопаток турбин используется литье методом направленной кристаллизации. В связи с существующим неизбежным отклонением точности литейных поверхностей каждой индивидуальной лопатки в настоящее время на производстве существует проблема компенсации этой погрешности литья при дальнейшей механической обработке изделий. Для того чтобы произвести механическую обработку, в первую очередь необходимо правильно установить заготовку, т.е. придать ей правильное положение относительно выбранной системы координат. Для сопловых лопаток такое положение определяется по шести базовым литейным точкам. Однако, на практике, при таком варианте

базирования сопловых или рабочих лопаток, а именно на их проточным частям возможно появление искаженной геометрии по сравнению с эталоном, что связано с погрешностью литья отливок (рис.1).

Разработан способ адаптивного глубинного шлифования сопловых лопаток турбины с применением автоматизированного расчета величин смещений. По традиционной технологии на моторостроительных предприятиях в стране и за рубежом обработка базовых поверхностей сопловых лопаток газотурбинных двигателей проводится на плоскошлифовальных станках типа ЛШ-220 и модернизированных токарно-лобовых станках типа МК163М

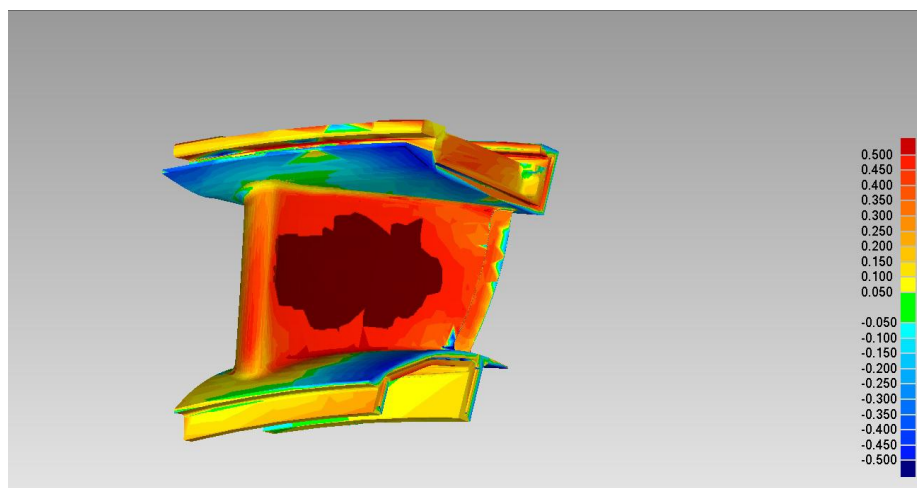


Рис. 1. Погрешность литья (темное пятно) на проточной части сопловой лопатки.

Обработка выполняется с большим количеством установок, к тому же требуется приспособление для каждой установки, что приводит к дополнительным погрешностям. Все эти факторы приводят к тому, что при сборке соплового аппарата появляются погрешности между базовыми поверхностями лопатками. В результате после сборки соплового аппарата площадь проходного сечения (Рис. 2) не соответствует заданному значению, а это, в свою очередь, влияет на мощность и КПД авиационного двигателя в целом [3].

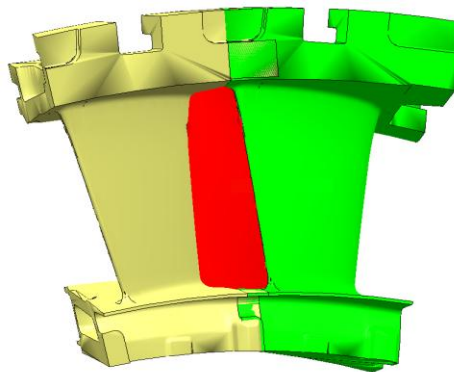


Рис. 2 Площадь проходного сечения для пары лопаток

Разработана технология, позволяющая учесть погрешности, полученные в процессе отливки лопатки, в процессе глубинного шлифования базовых поверхностей лопатки на многоосевом станке с ЧПУ и при последующей сборке соплового аппарата. Реализация данной задачи оказалась возможна только после определения причин возникновения основных погрешностей в существующей технологии. Для компенсации основных погрешностей было разработано специальное программное обеспечение (СПО), которое рассчитывает файл смещения для каждой лопатки [4]. Обработка лопатки производится с учетом коррекций, рассчитанных СПО. Основной задачей СПО является расчет смещений и углов поворота лопатки, исходя из начальных заданных параметров. Возможности СПО позволяют изменять начальные параметры для получения необходимых параметров площади проходного сечения соплового аппарата. В СПО заложены возможности анализа и корректировки соплового аппарата.

Программное обеспечение позволяет совмещать лопатки различными способами в зависимости от выбранных входных параметров. Можно решать задачу по совмещению сопловой лопатки по базовым точкам без учета геометрии самой лопатки. Второй вариант основывается на совмещении по перу лопатки без учета базовых точек. Существует и третий вариант, который учитывает оба варианта совмещения, но тогда требуется дополнительная проверка припуска на обрабатываемых поверхностях. На

практике заложенного значения припуска не хватает для выполнения всех условий совмещения без наложения ограничений.

При загрузке двух и более отливок СПО дает возможность задания дополнительной коррекции на площадь проходного сечения. На основе совмещенных по проточной части моделей производится построение сборки сектора из нескольких лопаток или всего соплового аппарата в целом (рис.3).

Для испытания СПО программы использовали три лопатки, так как проверять на полном комплекте нецелесообразно по причине больших трудозатрат и стоимости опытных работ.

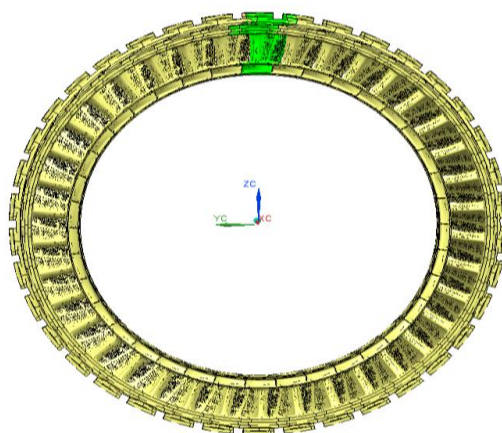


Рис. 3. Построение сборки соплового аппарата

Обработка трех лопаток дает представление о фактических разбросах площади проходного сечения пары лопаток от заданного значения площади, а также отклонение от общей площади всего соплового аппарата.

Таблица 1

Значения проходного сечения для пары лопаток

ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ					
Отливки	Теоретические значения до введения коррекции (рассчитано с использованием СПО), мм ²	Теоретические значения после введения коррекции (рассчитано с использованием СПО), мм ²	Фактическое значение с учетом коррекции (после обработки), мм ²	Погрешность измеренной площади, ± S, мм ²	Номинальная площадь проходного сечения для пары лопаток по чертежу (ТУ), мм ²
Лопатка 1, Лопатка 2, Лопатка 3	896.5 901.1	916.1 916.8	876.1 887.3	3,58	916,4

Лопатка 1, Лопатка 2, Лопатка 3	903.6 905.1	917.7 914.8	918.3 916.7	3,52	
Лопатка 1, Лопатка 2, Лопатка 3	911.5 904.4	917.0 915.4	917.1 919.1	3,58	

Произведенный опыт показал работоспособность разработанного СПО и корректность его работы. Эксперимент проводился 3 раза для подтверждения повторяемости результатов расчета СПО [5].

Применение технологии глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток турбин на многокоординатном обрабатывающем шлифовальном центре позволит производить обработку с минимальным количеством установок лучшим качеством и с большей производительностью.

Применение СПО должно обеспечить расчет величин смещений и углов поворота, необходимых для компенсации при шлифовке базовых поверхностей погрешность литья проточной части сопловой лопатки.

Применение СПО, как видно из таблицы 1, дает возможность повлиять на проходное сечение после анализа фактической геометрии отливок и скорректировать площадь проходного сечения сопловых лопаток в пределах погрешности измерения площади.

Результатом использования СПО является повышение точности и качества сопловой лопатки, а также снижение разброса значений площади проходного сечения в сопловом аппарате, вследствие чего ожидается увеличение КПД турбины авиационного двигателя.

Список литературы

1. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели : [монография] / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь, 2006. - 1195 с.
2. Макаров В.Ф. / Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 320 с.

3. Полетаев, В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин : [монография] / В.А. Полетаев, Д.И. Волков. – М. : Машиностроение, 2009. – 272 с.

4. Макаров В.Ф. / Выбор высокоэффективных абразивных инструментов и режимов резания для различных видов шлифовальных заготовок: учебное пособие / В.Ф. Макаров. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 276 с.

V.F. Makarov, d.en.s.,

S.P. Nikitin, A CAND.TECH.SCI.

A.O. Norin , THE POST-GRADUATE STUDENT,

R.A. Turansky, undergraduate,

(Perm National Research Polytechnic University, Perm)

**WORKING OUT OF A METHOD OF CORRECTING
MANAGEMENT BY PROCESS OF DEEP GRINDING OF BASE
SURFACES NOWORK BLADES ON THE MULTIAXIAL MACHINE
TOOL WITH CNC**

Abstract

For maintenance of high efficiency and demanded draught gas turbine the engine designers calculate size of the effective area blades section through passage tunnel the device. At assemblage tunnel the device accuracy of section through passage depends on accuracy of manufacturing of foundry surfaces of a profile of shovels and accuracy at deep grinding of base adjusting surfaces by everyone individual tunnel shovels. The technology of grinding of base surfaces of shovels existing before did not consider an error of molding of shovels, long adjustment of shovels for maintenance of section through passage. For performance of this problem (PO) preparations of data the software complex is developed for grinding of shovels which includes ON for the automated calculation of sizes of displacement and turn corners сопловых and working shovels. In data PO automatic process of reception of sizes of indemnification of displacement and

corners of turn which includes batch operation by results of numbering of the complete set of shovels is developed.

Keywords: section through passage, turbine shovels, deep grinding, profile surfaces, grinding circles.

УДК 621. 92

В.Ф. Макаров, А.В. Григорьева

**ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ОХЛАЖДАЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ В
ЛОПАТКАХ ТУРБИН С ТЕПЛОЗАЩИТНЫМ КЕРАМИЧЕСКИМ
ПОКРЫТИЕМ НА СТАНКЕ С ЧПУ**

Сведения об авторах: **Владимир Федорович Макаров** , д.т.н., проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь, e-mail: makarovv@pstu.ru , 89124915014; **Анна Васильевна Григорьева**, магистрант (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, e-mail: Grigoreva-Anuta@ya.ru)

Аннотация

Приведен анализ методов обработки отверстий малых диаметров в лопатках турбин с керамическим покрытием совмещенным лазерно-электроэрозионным способом с применением полого вращающегося электрода на станке с ЧПУ.

Для обеспечения требуемых высоких параметров качества поверхностного слоя, надежности и долговечности работы лопаток ГТД при одновременном повышении производительности и снижении себестоимости их изготовления разработана новая технология обработки охлаждающих отверстий лопаток турбин. Существующая прежде технология предусматривала получение отверстий методом электроэрозионной обработки, которая не могла применяться в чистом виде в связи с тем, что лопатки

покрывались керамическим слоем, который являлся диэлектриком. В результате требовалась слесарная зачистка надфилями закупоренных керамикой отверстий. Для решения данной проблемы разработана новая технология и подобрано новое оборудование - обрабатывающий центр FHDrill / Mill 800 фирмы WINBRO (Великобритания), который благодаря сочетанию возможности электроэрозионной и лазерной обработки в одной единице оборудования обеспечивает требуемое качество отверстий и удаление теплозащитного покрытия, имеет очень широкие технологические возможности, позволяющие проводить обработку лопатки за один установ.

Ключевые слова: лазерная абляция, электроэрозия, электроэрозионная прошивка, электрод-инструмент, сверление отверстий малых диаметров, керамическое покрытие, базирование детали.

Особенности получения отверстий малых диаметров

При производстве деталей газотурбинных двигателей длительное время существует проблема повышения эффективности обработки многочисленных разнонаправленных охлаждающих отверстий малых диаметров (0,3-2 мм) в жаропрочных сплавах на никелевой основе.

Отверстия малого диаметра получают различными способами: сверлением сверлами малого диаметра, лазерным и электронным лучом, электроэрозионной обработкой, электрохимической и ультразвуковой обработкой, струйно-абразивной обработкой и др. Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки.

Процесс изготовления отверстий в лопатках очень трудоёмкий. Связано это с применением устаревшего оборудования, на котором сейчас в основном и прошивают отверстия на моторостроительных предприятиях. Отверстия разделены на группы (ряды). Обработка отверстий ведётся вертикально. Каждая группа отверстий обрабатывается в отдельном приспособлении. Производится одновременная обработка группы отверстий (до 20) электродами-инструментами (электродами) соответствующего количества, закреплённых в державке. Электроды направляются через отверстия в кондукторной планке, ориентированной относительно приспособления. Глубина обработки задаётся для группы отверстий

одинаковая, наиболее глубокая. Минусы данной технологии в том, что много времени тратится на установку детали, и на переустановку. Так же, когда гребёнка электродов опускается и прожигает отверстия, износ электрод инструмента идёт не равномерно, из-за этого приходится останавливать обработку, поднимать электроды и выравнивать их. Так же для разных отверстий приходится вручную переустанавливать электроды. На обработку требуется большое количество специальной оснастки. К примеру, для оснащения одного наименования лопатки количество шифров оснастки, применяемой при электроэрозионной обработке отверстий может достигать до 40-50 штук. Кроме того, электроэрозионное оборудование указанных моделей имеет устаревшие генераторы. При обработке от этих генераторов образуется значительный измененный слой, в котором зарождаются недопустимые трещины. Помимо этого, в последнее время получение таких отверстий осложняется применением дополнительного керамического теплозащитного покрытия. Это покрытие толщиной 0,1- 0,3 мм является диэлектриком и не позволяет применять чистую электроэрозионную прошивку. Также это приводит к использованию дополнительных малопроизводительных операций, таких как слесарная зачистка надфилями закупоренных керамикой отверстий.

Поэтому предварительно производят электроэрозионную прошивку, покрывают лопатку керамическим покрытием, а затем с отверстий испаряют это керамическое покрытие лучом лазера. Такая обработка проводится на станке FHDrill/Mill 800 фирмы Winbro (рис. 1), на данный момент это единственный станок в мире, совмещающий в себе лазерную и электроэрозионную обработку.



Рис.1. Станок FNDrill/Mill 800 производства фирмы WINBRO GROUP (Великобритания) для совмещенной электроэрозионной и лазерной обработки

Лазерная абляция

Испарение керамического покрытия лучом лазера будет осуществляться применением метода лазерной абляции.

Лазерная абляция (англ. *laser ablation*) — метод удаления вещества с поверхности лазерным импульсом. При низкой мощности лазера вещество испаряется или сублимируется в виде свободных молекул, атомов и ионов, то есть над облучаемой поверхностью образуется слабая плазма, обычно в данном случае тёмная, не светящаяся. При плотности мощности лазерного импульса, превышающей порог режима абляции, происходит микровзрыв с образованием кратера на поверхности образца и светящейся плазмы вместе с разлетающимися твёрдыми и жидкими частицами (аэрозоля). При взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом происходит ряд теплофизических процессов, которые схематично представлены на рис.2.

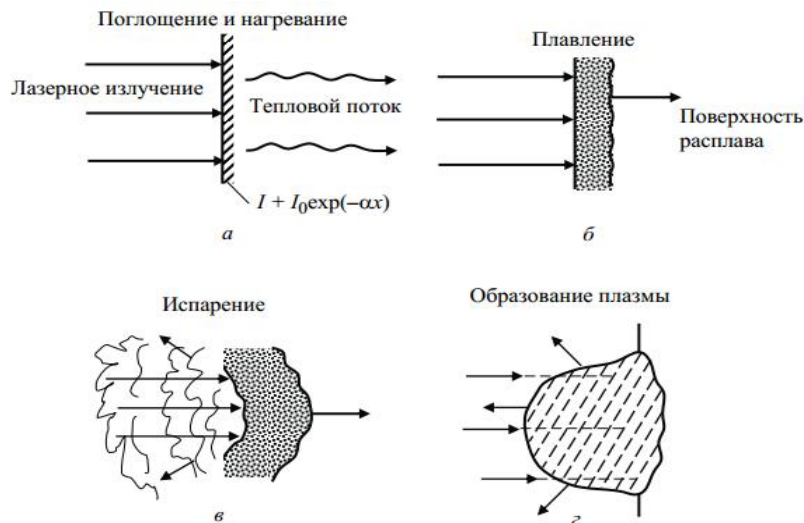


Рис 2. Основные физические процессы, возникающие при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом

Лазерное излучение, падающее на обрабатываемую поверхность, поглощается. Выделившееся тепло распространяется в глубь материала за счет теплопроводности (рис 2, а). Далее происходит его нагрев, а после того как температура поверхности достигает точки плавления, начинается распространение границы жидкой фазы в глубь материала (рис. 2, б). При дальнейшем облучении материала продолжается процесс нагрева, на этот раз – до температуры испарения (кипения). По достижении этой температуры инициируется процесс испарения вещества с обрабатываемой поверхности (рис. 2, в), сопровождающийся ионизацией поверхностных примесей и загрязнений, которые практически всегда в том или ином виде присутствуют. Далее излучение поглощается основным материалом, и если интенсивность недостаточно высока, материал плавится, испаряется, а пары ионизируются. При этом давление паров способствует выплескиванию расплава, и в материале постепенно формируется отверстие.

Если интенсивность излучения слишком велика, то в результате испарения образуется высокотемпературная непрозрачная плазма. Образовавшаяся плазма может распространяться навстречу лазерному пучку в форме индуцированной лазером волны поглощения. Облако плазмы

поглощает падающее лазерное излучение и экранирует поверхность образца, препятствуя тем самым дальнейшему воздействию лазера на вещество (рис. 2, г).

Применение лазерной абляции позволит испарить керамический слой с поверхности лопатки, тем самым открыв готовое отверстие, полученное после ЭЭ сверления. Обрабатывающий центр FHDrillMill-800 оснащен новейшим волоконным лазером G4 50W S-Type redENERGY для процесса абляции (испарения) (рис.3). Этот лазер идеально подходит для обработки 2х и 3х мерных элементов в деталях турбин, как с керамическим покрытием, так и без покрытия. Лазерный луч направляется на деталь через скоростной 2хмерный сканер, фокусирующую головку и оптику. Сканер управляет лазерным лучом по запрограммированному пути, удаляя каждый слой материала обрабатываемого элемента.



Рис. 3. Волоконный лазер G4 50W S-Type redENERGY

Электроэрозионное сверление отверстий

Широкое применение получило электроэрозионное прошивание – сверление отверстий малого диаметра. Для ЭЭО используется электроэрозионная головка (рис. 4).

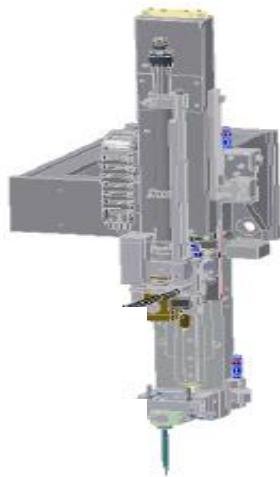


Рис. 4. Электроэрозионная головка станка Winbro FHD Drill/Mill 800

Станки, специализированные на такую обработку, называют супердрелями. Супердрели способны производительно прошивать отверстия в твердых металлах с отношением глубины к диаметру до 200:1. В качестве рабочих жидкостей используются дистиллированная вода и специальные составы на водной основе. Рабочая жидкость под давлением подается через отверстия в ЭИ и оптимально удаляет из отверстия частички шлама и образующиеся газы. Electrodes направляются через кондукторные втулки, изготавливаемые из алмаза, сапфира и других сверхтвердых материалов. Благодаря оборудованию класса «Супердрель» появилась возможность выполнять в охлаждаемых лопатках турбины отверстия диаметром 0,2 ... 0,3 мм на глубину до 10 мм. Изготовление таких отверстий традиционными методами сопряжено с большими трудностями, а иногда вообще невозможно. В авиационной промышленности, как и в других областях машиностроения, значительный интерес представляет собой разработка эффективных технологий и оборудования для перфорации лопаток и других деталей машиностроения. В настоящее время для перфорации лопаток электроэрозионным способом используются электроды-инструменты двух типов - трубчатые и стержневые с диэлектрической оболочкой. Ряд фирм выпускает трубчатые электроды диаметром до 0,3 мм. Компания Winbro проектирует, изготавливает и собирает инструмент для скоростной

электроэрозионной обработки для станка Winbro FHD Drill/Mill 800. Инструмент сконструирован с учетом оптимального расстояния между цангой и направляющей, что позволяет быстро перемещаться от отверстия к отверстию, даже имея короткий электрод, так как заправка и вытягивание электрода требуются не часто. Линейка инструментов ЭЭО включает:

- инструмент с одним невращающимся электродом (SPS) подает полый электрод-трубочку к обрабатываемой детали. Инструмент способен прокачивать через электрод деионизированную воду под давлением до 100 Бар, а также подавать воду под низким давлением вокруг электрода. Инструмент оснащен функциями автоматической заправки и подачи электрода. Электрод не вращается.

- SPS - Электроды диаметром от 0.25мм до 3.0мм длиной до 457мм

- XSPS - Электроды диаметром от 0.50мм до 25.0мм длиной до 700мм

Инструмент с одним вращающимся электродом (SPR) имеет такие же возможности, как и инструмент SPS Tools, однако инструмент SPR может вращать электрод со скоростью до 1000 об/мин, при этом сверление происходит более эффективно, что особенно важно для сверления глубоких отверстий.

- SPR - Электроды диаметром от 0.25мм до 3.0мм длиной до 600мм

- XSPR - Электроды диаметром от 0.50мм до 6.5 мм длиной до 700мм

Инструмент с системой автоматической заправки электродов (AEC) имеет такие же возможности, как и инструмент SPR, однако инструмент AEC может хранить до 12 электродов (все одного диаметра) в магазине карусельного типа, каждый в своем гнезде. Инструмент может автоматически загружать и выгружать электроды.

- AEC – Электроды диаметром от 0.25мм до 2.5мм длиной до 457мм

- XAEC – Электроды диаметром от 0,25мм до 3.0мм длиной до 457мм

С целью подтверждения теоретических аспектов эффективности электроэрозионного сверления отверстий малых диаметров трубчатым вращающимся ЭИ в жаропрочных сплавах была проведена

исследовательская работа. Опытная ЭЭО производилась в образцах из жаропрочного сплава на никелевой основе на специальном электроэрозионном станке с ЧПУ типа «супердрель» модели TSH-600V. Методом практического приближения параметров (характеристики импульса, амплитуда напряжения и тока, параметры регулирования сервопривода, давление прокачки), влияющих на электроэрозионный процесс, была произведена оптимизация режима ЭЭО: максимальная производительность при относительно малом износе ЭИ. При этом производились металлографические исследования обработанной поверхности для определения граничных условий относительно качества микроструктуры: предельное значение высоты изменённого слоя задавалось не выше 40 мкм (уровень при котором не наблюдаются микротрещины). На оптимизированных практически режимах ЭЭО провели серию опытов позволяющих провести сравнительный анализ с традиционной обработкой группой ЭИ. Обработка производилась латунным трубчатым ЭИ диаметром 0,9 мм на глубину 17 мм при которой прекращается ЭЭО сплошным стержневым ЭИ. Во время обработки фиксировали время прохождения каждого миллиметра с замером износа ЭИ. Полученную зависимость сопоставили с существующей зависимостью традиционной ЭЭО сплошным стержневым ЭИ из вольфрама диаметром 0,9 мм. Время обработки одиночного отверстия трубчатым ЭИ во много раз ниже, чем при традиционной ЭЭО и разрыв увеличивается с увеличением глубины обработки. Длительность обработки отверстия глубиной 1 мм при электроэрозионном сверлении составляет 0,04 мин, что в 25 раз меньше, чем время при традиционной ЭЭО, которое составляет 1 мин. При глубине 14 мм время эрозионного сверления составляет 0,64 мин в 40 раз меньше, чем время при ЭЭО стержневым ЭИ, которое составляет 25 мин.

При электроэрозионной обработке с использованием вращающегося полого ЭИ скорость подачи мало зависит от глубины внедрения. В среднем скорость подачи трубчатого ЭИ в 36 раз выше, чем сплошного стержневого

На следующем этапе трубчатым вращающимся ЭИ были обработаны группы по 13 отверстий на разную глубину с шагом 1 мм. Фиксировалось время от начала обработки 1-ого отверстия до окончания 13-го, включающее время переходов. При сопоставлении графиков ЭЭО 13-ти отверстий одиночным вращающимся ЭИ и группой ЭИ традиционной схемы установлено, что на малых глубинах время обработки отверстий при обоих схемах практически одинаково. Время обработки 13-отверстий на глубину 1 мм полым ЭИ составляет 0,5 мин, группой ЭИ в 2 раза выше и составляет 1 мин. С увеличением глубины обрабатываемых отверстий время обработки при традиционной схеме резко увеличивается по отношению к времени обработки одиночным ЭИ. На глубине 14 мм время электроэрозионного сверления 13-ти отверстий составляет 8 мин., в 12 раз меньше, чем время ЭЭО группой ЭИ, которое составляет 96 мин.

Разрыв времени ЭЭО 13 отверстий между полым ЭИ и традиционной схемы на малой глубине ниже по отношению к обработке одиночного отверстия, но с увеличением глубины возрастает. Так на глубине 1 мм разрыв при обработке одиночного отверстия составляет 0,96 мин, при обработке 13 отверстий на 0,46 мин меньше и составляет 0,5 мин. При глубине 14 мм разрыв времени обработки одиночного отверстия составляет 24,38 мин, при обработке 13 отверстий увеличивается на 63,62 мин и составляет 88 мин. Очевидно, что с увеличением количества одновременно обрабатываемых отверстий критическая глубина, с которой начинается увеличение разрыва времени будет увеличиваться.

Сравнительный анализ показал, что «струйная» электроэрозионная обработка имеет преимущество перед традиционной, особенно при обработке относительно малых групп отверстий глубиной более 5 диаметров. При «струйной» обработке более высокая производительность, чем при традиционной электроэрозионной обработке.

Исследования показывают, что как при струйной ЭЭО, так и при традиционной обработке износ ЭИ и глубина измененного слоя зависят от

электрических параметров режима обработки и состава РЖ. Величина износа возрастает с увеличением частоты следования импульсов. При струйной ЭЭО отверстий в лопатках из жаропрочных сплавов с применением дистиллированной воды линейный фактический износ ЭИ составил 80-100 %. При использовании специальных РЖ износ снижается до 30-50 %. Глубина измененного слоя зависит от частоты следования импульсов и рабочего тока: при частоте выше 88 кГц и токе 2-3 А глубина измененного слоя составляет не более 10-15 мкм при обработке указанных материалов.

Металлографические исследования поверхностного слоя отверстий в лопатках турбины из сплава ЖС6У, обработанных методом струйной ЭЭО на производительных режимах, показали, что вдоль отверстий наблюдается измененный слой глубиной до 20-50 мкм. Микротвердость данной зоны $HV = 582\sim 645$ кгс/мм², а основного материала — $HV = 429\sim 449$ кгс/мм².

Были также проведены работы по модернизации технологического процесса ЭЭО отверстий диаметром 1,2+0,2 мм в лопатках турбины авиационного двигателя. По существующей технологии отверстия обрабатываются многоэлектродным инструментом на отечественных станках. Максимальная глубина отверстий — 9 мм; материал лопатки — ЖС6У. Для повышения стабильности и надежности ЭЭО были изучены различные технологические приемы: влияние прокачки РЖ, вращение ЭИ, возможность обработки отверстий по программе. Как показали результаты исследований, наиболее эффективной является ЭЭО на станках с ЧПУ в автоматическом режиме с прокачкой РЖ через электрод. Процесс обработки отверстий осуществляется стабильно со скоростью до 2-3 мм/мин. Для повышения качества обработки и уменьшения глубины измененного слоя были проведены эксперименты с применением высокочастотных режимов и технологических схем с орбитальным движением электрода.

Результаты металлографических исследований показывают, что глубина измененного слоя в этом случае не превышает 10-16 мкм. Однако полностью исключить измененный слой после электроэрозионной обработки

отверстий в лопатках, даже при использовании мягких режимов на частотах 200 кГц и более, не удастся. На обработанной поверхности остается измененный слой глубиной до 5-10 мкм. Время операции электрохимической обработки составляет 8-10 с для удаления слоя толщиной до 100 мкм.

Технологии автоматического базирования детали с помощью щупа Renishaw

С помощью данного щупа деталь быстро измеряется на станке, прямо в рабочей позиции (рис. 5). Определяются отклонения заготовки в пространстве от номинального положения и ориентации.

Отпадает необходимость в сложной оснастке для базирования и крепления детали, не надо полагаться на оператора, чтобы обеспечить «хороший» зажим детали в приспособление. В связи с тем, что детали выверяются на станке непосредственно перед сверлением, то не требуется внешние данные для управления. Перед сверлением проверяется только несколько заданных конструктором точек. Процесс прямого обмера выявляет отклонение от номинальной позиции в каждой точке. Затем собранные данные математически обрабатываются, и производится расчет соответствующей коррекции сдвига и поворота детали. После введения этой коррекции деталь повторно проверяется.

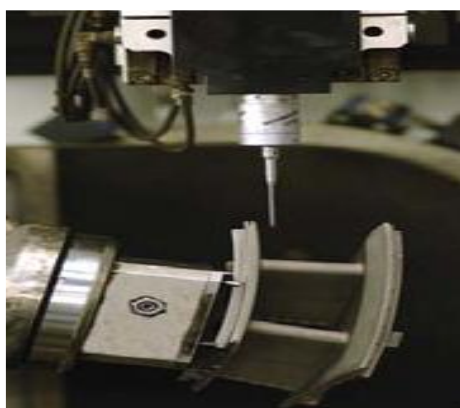


Рис.5. Базирование детали с помощью щупа Renishaw

Преимущества использования данного метода:

- Щуп Renishaw может быть успешно применен для обмера детали.
- Позволяет использовать дешевую оснастку для установки детали.
- Гарантирует точное соответствие обработанных отверстий электронной модели детали.
- Может учесть небольшие отклонения литых заготовок лопаток.

Технология базирования детали по 6-ти точкам запатентована Winbro Group: «Программное обеспечение для применения щупа Renishaw при базировании деталей с аэродинамическим профилем».

Последовательность цикла обработки

1. Установка лопатки в приспособление (при помощи резьбовой шпильки проходящей через внутреннюю полость) (Рис.6);



Рис.6. Установка лопатки в приспособлении

2. Ощупывание лопатки по 6 контрольным точкам. Станок ощупывает деталь с помощью щупа и сам позиционирует её по 6 контрольным точкам при помощи совмещения с геометрической моделью лопатки (рис.7);

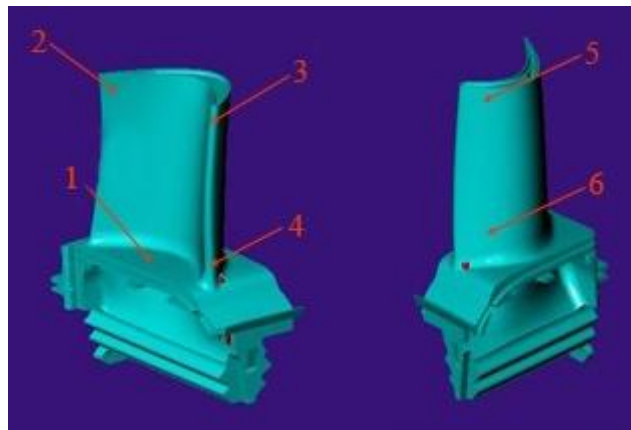


Рис. 7. Шесть контрольных точек

3. Автоматическая корректировка программы после обмеров;
4. Подход электроэрозионной головки. Электроэрозионная обработка;
5. Отвод электроэрозионной головки;
6. Подход лазерной головки к заготовке. Лазерная обработка;
7. Отход лазерной головки;
8. После прошивки всех отверстий одноэлектродный инструмент заменяется на контрольное приспособление с измерительным лазером. Лазерный луч находит каждое из обработанных отверстий, определяется диаметр отверстия и его координаты. На выполнение замеров по одному отверстию затрачивается 15 секунд. По результатам замеров формируется протокол.

На электроэрозионных станках, специализированных для обработки отверстий в лопатках, установлены специальные системы, позволяющие отслеживать выход электрода во внутреннюю полость лопатки и сигнализировать о врезании электрода в противоположную стенку.

Данный обрабатывающий центр способен выполнять следующие операции:

- Лазерная абляция (испарение) рабочих и сопловых лопаток авиационных турбин с керамическим покрытием и без покрытия;

- Скоростная ЭЭО 2D и 3D элементов рабочих и сопловых лопаток авиационных турбин;
- Лазерная абляция (испарение) для зачистки литейных керамических стрежней лопаток;
- Лазерная абляция (испарение) для повторного открытия охлаждающих отверстий после нанесения термозащитного покрытия;
- Скоростное ЭЭ фрезерование уплотнительных пазов и других элементов деталей турбин;
- Скоростное сверление малых камер сгорания до 250 мм в диаметре.

Разработка управляющих программ для станка FHDrill/Mill 800 в CAD/CAM системе NX

При разработке управляющих программ (УП) используется CAD/CAM система NX. В NX нет стандартных операции для построения траектории лазерной абляции и электроэрозионной обработки. Траекторию, аналогичную траектории лазерной абляции можно получить с помощью модуля NX «Фрезерование». Фрезерные операции NX позволяют создавать необходимые траектории, но их использование в «классическом» виде приводит к высоким временным затратам, так как лазерная абляция производится послойно. Каждый слой является плоским и может состоять из различного числа проходов, например, как показано на рис. 8. Число слоев для одного элемента обработки может варьироваться от нескольких десятков до нескольких сотен и каждый из них нужно описывать с помощью отдельной серии операции обработки. В результате, для обработки одного отверстия пользователь вынужден создать несколько сотен однотипных операции, что занимает нерационально много времени.

Для реализации автоматизированного построения траектории лазерной абляции и электроэрозионной обработки в NX, а также операций базирования, и получения управляющих файлов для станка FHDrill/Mill 800,

разработано специализированное программное обеспечение (СПО), состоящее из нескольких модулей:

- Модуль для генерации траектории лазерной абляции и ЭЭО в NX, а также формирование дерева обработки с пользовательскими событиями для корректной работы постпроцессора;
- Постпроцессор в системе NX для вывода управляющих файлов с лазерной абляцией, электроэрозионной обработкой и базированием.

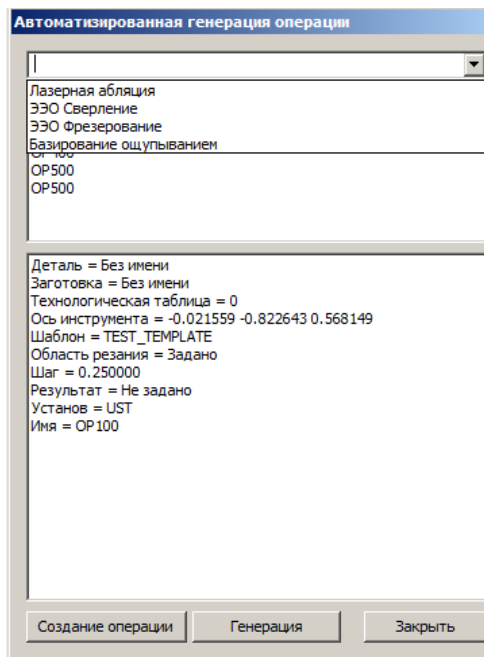


Рис. 8. СПО для генерации траектории лазерной абляции, электроэрозионной обработки и базирования

Особенностью технологической подготовки данных для данного станка является то, что при генерации файлов после постпроцессора получаем управляющие файлы, а не управляющую программу. Управляющие файлы могут содержать в себе одновременно различные операции обработки (лазерную абляцию, ЭЭО, операции базирования), технологические данные и т.д. Это возможно благодаря особенностям системе Euclid, используемой в стойке ЧПУ станка FNDrill/Mill 800.

Управляющие файлы могут быть двух видов:

1. Файлы формата csv – табличные файлы, представляющие собой текстовые файлы с данными, разделенными на колонки с помощью запятых;

2. Файлы формата h – файлы с траекториями, например, движения лазерного луча относительно сканирующей головки.

Генерация траектории ЭЭО выполняется стандартными средствами NX - операциями сверления и фрезерования.

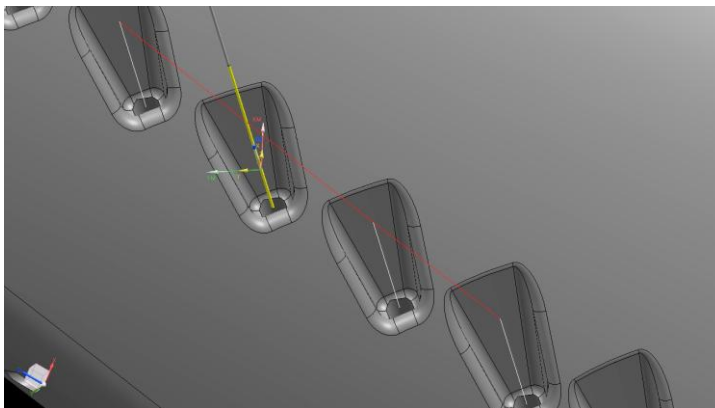


Рис. 9. Расчётная модель обработки отверстий методом ЭЭО в программе NX

В управляющих файлах для ЭЭО нет траектории обработки, а только указан центр отверстия с необходимыми технологическими параметрами для электроэрозии.

В программе отображается таблица с технологическими параметрами, описывающую глубину слоя, полярность, силу тока, частоту вращения шпинделя, давление СОЖ и др.

Отдельно программируются операции для базирования заготовки.

Для реализации операции базирования необходимо выбрать 6 точек на заготовке, расположенных определенным образом.

Типы применяемых к точкам ограничений:

- Линейное – работают только линейные оси (X,Y,Z);
- Цилиндрическое - допускается поворот детали вокруг заданной оси (может не совпадать с одной из поворотных осей) и линейное перемещение вдоль оси цилиндра;
- Сферическое – допускается только поворот детали без линейных перемещений.

Для каждой точки задаются не только тип, но и различные дополнительные параметры, такие как координаты измеряемой точки, точки определения оси цилиндра, расстояния от оси цилиндра до измеряемой точки и т.д.

Таким образом, вся подготовка производства для станка FHDrill/Mill 800 ведется в системе NX, с использованием СПО для вывода управляющих файлов абляции, ЭЭО и базирования. Это делает возможным значительно ускорить процесс подготовки управляющих файлов, также использование NX позволяет снизить количество ошибок по сравнению с ручным программированием управляющих файлов.

Выводы

1) Разработана новая технология обработки охлаждающих отверстий лопаток турбин путем применения совмещенной электроэрозионной и лазерной обработки на обрабатывающем центре FHDrill / Mill 800;

2) Разработано специальное программное обеспечение для обрабатывающего центра FHDrill / Mill 800, применение которое повышает производительность и точность обработки данных отверстий.

Проведены испытания по совмещенной электроэрозионной и лазерной обработке в ходе которых выявлено, что работа двух головок возможна, при этом станок обеспечивает требуемое качество отверстий и удаление теплозащитного покрытия. Благодаря сочетанию возможности электроэрозионной и лазерной обработки в одной единице оборудования, обрабатывающий центр FHDrill / Mill 800 имеет очень широкие технологические возможности:

- позволяет с одной установки выполнять последовательно лазерную и электроэрозионную обработку;

- для таких деталей, как лопатка турбины предусмотрен обмер каждой детали по шести точкам с использованием щупа Renishaw и дальнейшее

автоматическое базирование детали с учетом реальных отклонений детали от ее геометрической модели.

- возможность вести обработку деталей в автономном режиме (без участия оператора) при условии оснащения его роботом-манипулятором для загрузки-выгрузки обрабатываемых деталей.

- автоматическая смена инструмента и проведение замеров обеспечиваются при помощи штатного шестипозиционного сменщика инструмента.

Применение станка FHD Drill / Mill 800 позволяет:

- обрабатывать отверстие глубиной 1 мм при электроэрозионном сверлении за 0,04 мин, что в 25 раз меньше, чем время при традиционной ЭЭО, которое составляет 1 мин. При глубине 14 мм время эрозионного сверления составляет 0,64 мин в 40 раз меньше, чем время при ЭЭО стержневым ЭИ, которое составляет 25 мин.

- уменьшить количество времени переналадки станка на смену детали до 5 минут и до нескольких секунд на смену инструмента, вместо наладки в 1 - 2 часа;

- сократить количество используемой оснастки с 40-50 до 1-2 приспособлений;

- произвести обработку отверстий за один установ лопатки.

Библиографический список

1) Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий : монография - Белгород: Изд-во БГТУ, 2010.-314с.

2) Владыкин А.В., Макаров В.Ф. Повышение эффективности обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов на основе применения метода электроэрозионного сверления / Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. – 2010 – №2 (17) – С. 29-37.

3) Владыкин А.В., Макаров В.Ф. Расчёт производительности высокоскоростной электроэрозионной обработки отверстий в жаропрочном сплаве полым вращающимся электродом-инструментом / Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ – 2012): материалы IV Междунар. науч. – техн. конф., посвящ. 75-летию В.Ф. Безъязычного, 3-5 сент. 2012 г., Рыбинск: в 2 ч. / М-во образования и науки РФ [и др.] – Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьёва, 2012 – Ч. II – С. 135-142.

4) Евсин Е.А., Бельтюков А.А., Пермяков И.А., Владыкин А.В. Исследование процесса электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра в деталях из жаропрочного сплава / Вестник ПГТУ – Пермь: ПГТУ, 2007 – С. 20-24.

5) Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Митрофанов А.А. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: Учеб. пособие – М.: Дрофа, 2002. – 656 с

6) Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь, 2006. – 1195 с.

7) Конструкция основных узлов двигателя ПС-90А. Учеб. пособие - 2-е изд. испр. и доп. / М.А. Нихамкин, М.М. Зальцман. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь 2002. – 108 с.

8) Козлов Д.А. ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России [электронный ресурс]/Д.А. Козлов. – Режим доступа: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>. Дата обращения: 22.09.2015.

9) Макаров В. Ф. Оптимизация процесса скоростной электроэрозионной обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов / В. Ф. Макаров, Абзаев Р.С. Владыкин В.А. / Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 2. – С. 15-22

10) Погонин А.А. Зависимость производительности и износа электрода-инструмента от его материала при электроэрозионной прошивке капиллярных отверстий / А.А. Погонин, А.Ф. Бойко, Т.А. Блинова//Наука на

рубеже тысячелетий: сб. мат-лов шестой междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 26-27 окт. 2009г./ Тамбов.гос.технич.ун-т.- Тамбов, 2009.-С.218-219.

Об авторах

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Григорьева Анна Васильевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: Grigoreva-Anuta@ya.ru).

Туранский Роман Александрович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: stomp911@ya.ru).

About the authors

Makarov Vladimir Fedorovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor department of «Innovation technologies in mechanical engineering», Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky Av., Perm, Russian Federation, e-mail: makarovv@pstu.ru).

Grigoryeva Anna Vasilievna (Perm, Russian Federation) – undergraduate department of «Innovation technologies in mechanical engineering», Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky Av., Perm, Russian Federation, e-mail: Grigoreva-Anuta@ya.ru).

Turansky Roman Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) – undergraduate department of «Innovation technologies in mechanical engineering», Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky Av., Perm, Russian Federation, e-mail: stomp911@ya.ru).

Application alignment of the laser-electroerosive processing of small holes in details from superalloys with ceramic coating on CNC machines

Abstract

For provision of a required quality of high parameters of a surface layer, reliability, and durability of operation of blades of gas turbine motors during simultaneous increase of productivity and a decrease of a cost price of their production new technology of treatment of cooling openings of turbine blades is developed. Previously existing technology envisaged receipt of openings by the method of an electro-erosion process which could not apply in well-made form in a respect to the blade's being coated with the ceramic layer which is dielectric. As a result plumber cleaning by files of openings clogged with ceramic was required. For resolution of this problem new technology is developed and new equipment is selected – the processing 800 FHD Drill / Mill center of the Winbro firm (Great Britain) which thanks to a combination of a possibility of an electroerosion and laser process in one equipment unit is providing required quality of openings and removal of heat insulation coating, he has very broad technological possibilities allowing to carry treatment of a vane of over one plant.

Keywords: laser ablation, electro-erosion, electro-erosive insertion, the electrode-tool drilling small diameter, ceramic coating, basing details.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИПУСКА НА ЗАГОТОВКЕ ПЕРЕД ЗУБОШЛИФОВАНИЕМ

V.P. Larshin, Doctor of Science (Engineering), Odessa national polytechnic university, Ukraine, Odessa, VPLarshin@rambler.ru

N.V. Lishchenko, PHD, Odessa national academy of food technologies, Ukraine, Odessa, odmnv@rambler.ru

On the basis of preliminary experimental data obtained by measuring the allowance for gear grinding by copying method on the HOFER RAPID 1250 machine it is analyzed the influence of the allowance measurement along the workpiece periphery on the operation piece-time. With the reduction of the number of measurements the measurement time reduces but grinding time increases, since allowance uncertainty increases and leads to moving the grinding wheel aside the workpiece in order to avoid the burn marks appearance.

Keywords: optimization, gear grinding, profile grinding wheel, allowance measurement, Fourier frequency transform, sampling theorem, allowance signal piecing out, operation piece-time.

Зубошлифование профильным кругом по методу копирования широко используется в промышленности при изготовлении зубчатых колес (ЗК) для авиационного и транспортного машиностроения [1].

Операцию профильного зубошлифования на станке с ЧПУ можно разделить на два вида работ [2]: измерение припуска на этапе наладки станка и зубошлифование на этапе обработки. Измерение выполняют профильным шлифовальным кругом или специальным измерительным щупом, например, при помощи измерительной системы компании Renishaw. В первом случае (шлифовальным кругом) измерения производят на заготовках ЗК с неудовлетворительным качеством поверхности, например, после цементации и закалки ЗК. Используется сигнал акустической эмиссии, возникающий в момент касания боковых сторон профиля круга и впадины ЗК. Интенсивность этого сигнала при попеременном касании правой и левой

стороны профиля впадины ЗК должна быть одинаковой. Во втором случае (измерительным щупом) измерения производят по относительно чистой поверхности перед зубошлифованием (рис.1), а также после его окончания (контроль после обработки). В основе метода измерения лежит способ центрирования измерительного инструмента относительно исследуемой впадины [3].

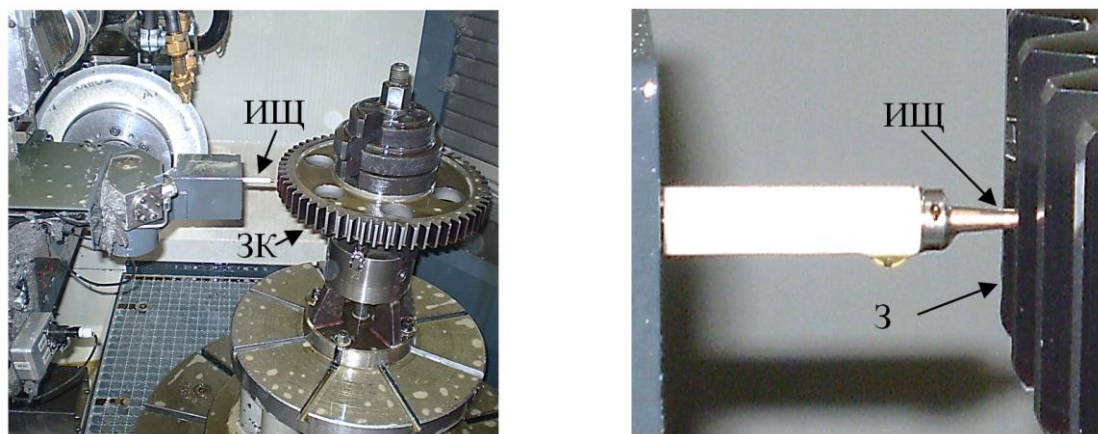


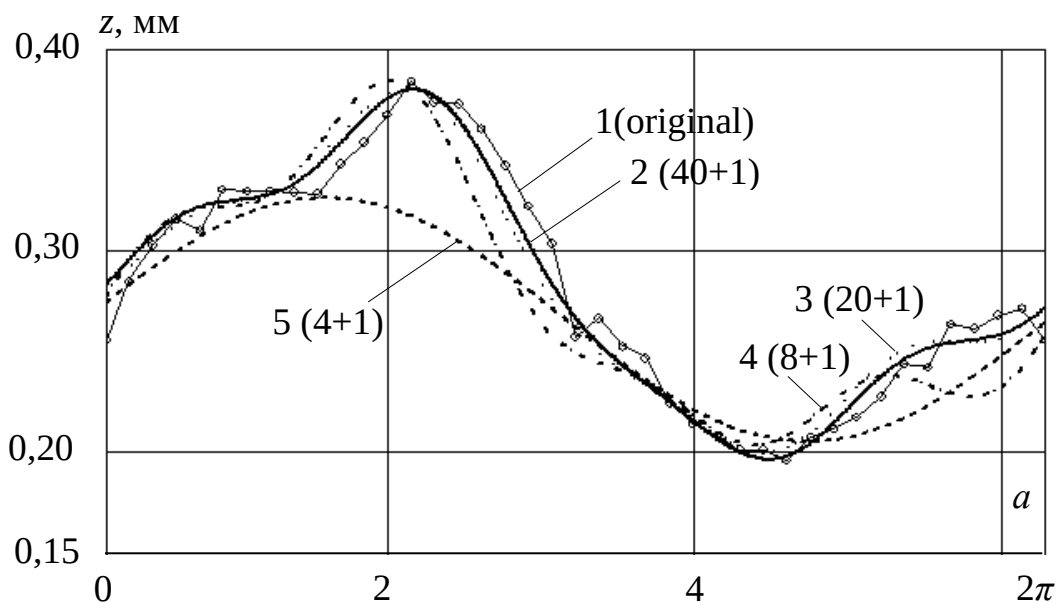
Рис.1 – Общий вид (слева) и зона измерения (справа) припуска измерительным щупом компании Renishaw на станке HOFLER RAPID 1250: ИЩ – измерительный щуп; ЗК – зубчатое колесо (52 зуба)

Однако в литературе нет сведений об особенностях автоматического цикла измерения и обработки ЗК на станках указанного типа, нет объективного анализа различных способов обмера впадин ЗК перед зубошлифованием. Нет данных об оптимальном числе измерений припуска по впадинам ЗК, расположенным при различном угловом положении по измерительной окружности ЗК. Дело в том, что с увеличением числа измерений имеют место две тенденции: время измерений возрастает, а время обработки уменьшается. Последнее вызвано тем, что за счёт уменьшения неопределённости припуска (с ростом числа впадин, в которых измеряют припуск) уменьшают добавку (запас) припуска на компенсацию его неопределённости. Это создаёт предпосылки для уменьшения общего времени на измерение и обработку за счёт оптимизации числа измерений.

Отсутствие данных о связи числа измеренных впадин с точностью оценки распределения припуска по измерительной окружности ЗК не позволяет выполнить оптимизацию цикла зубошлифования, включающего время на наладку и обработку.

При разработке способа восстановления сигнала (информации) о припуске на пропущенных впадинах могут быть использованы различные методы идентификации модели восстанавливаемого сигнала о величине припуска. Например, оценку параметров модели производят методом наименьших квадратов, если заранее известно, что в процессе присутствует гармоническая компонента, период которой задан [4]. Однако, как показано ниже в основе восстанавливаемой функции (function being pieced out) содержится не одна синусоидальная компонента, а некий набор таких компонент с разными периодами изменения, кратными периоду основной гармоники.

Выполнены исследования по восстановлению фактического распределения припуска по левой (рис.2,а) и правой (рис.2,б) сторонам впадин ЗК. впадин ЗК.



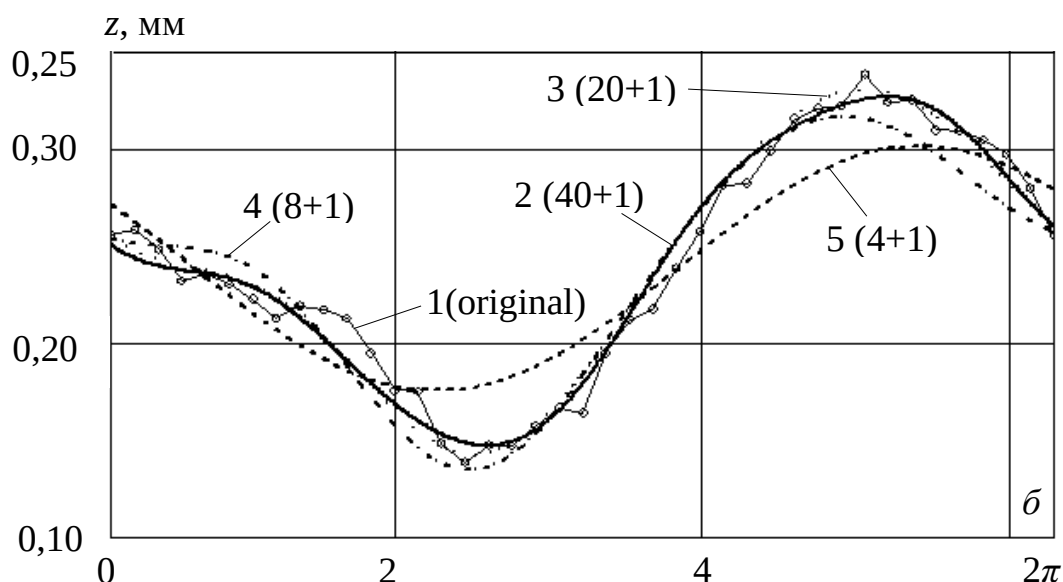


Рис. 2 – Восстановление непрерывной огибающей линии дискретного распределения припуска z по правой (а) и левой (б) стороне впадин заготовки ЗК с числом впадин 40 («+1» означает дополнение до периода 2π)

На примере ЗК с 40 впадинами (линия 1 на рис.2) выполнено восстановление непрерывной огибающей линии (сигнала) припуска при различном числе N дискретных измерений припуска: $N = 40$ (линия 2), $N = 20$ (линия 3), $N = 8$ (линия 4) и $N = 4$ (линия 5). Восстановление (piecing out) выполнено на основании частотного преобразования Фурье по дискретным отсчётам (samples) с равным угловым шагом. Число отсчётов (40, 20, 8 и 4) соответствует фактическому числу измерений припуска с постоянным угловым шагом между отсчётами (9° , 18° , 45° и 90°). В соответствии с известной теоремой отсчётов В. А. Котельникова (Nyquist–Shannon sampling theorem) потенциально выявляемые частоты гармоник для указанного числа отсчётов составляют $20f$, $10f$, $4f$ и $2f$, где f – частота основной гармоники с периодом 2π .

Особенностью частотного анализа дискретных сигналов, характеризующих ограниченный (2π) участок исходного сигнала (аналог временного процесса на ограниченном участке времени), является необходимость многократного повторения дискретного исходного сигнала

протяженностью 2π , т.к. периодические составляющие дискретного сигнала теоретически могут быть выявлены только для исходного «бесконечного» во времени периодического сигнала. Причём, с уменьшением числа отсчётов на периоде 2π число необходимых повторов сигнала на периоде 2π (40 отсчётов, 20 отсчётов, 8 отсчётов и 4 отсчёта) возрастает. Путём моделирования в программе LabVIEW 8.6 установлено число необходимых повторов указанных периодов дискретных последовательностей: 3, 5, 10 и 20 повторов. При уменьшении числа повторов, по сравнению с указанными числами, идентификация амплитуд и фаз составляющих гармоник затрудняется.

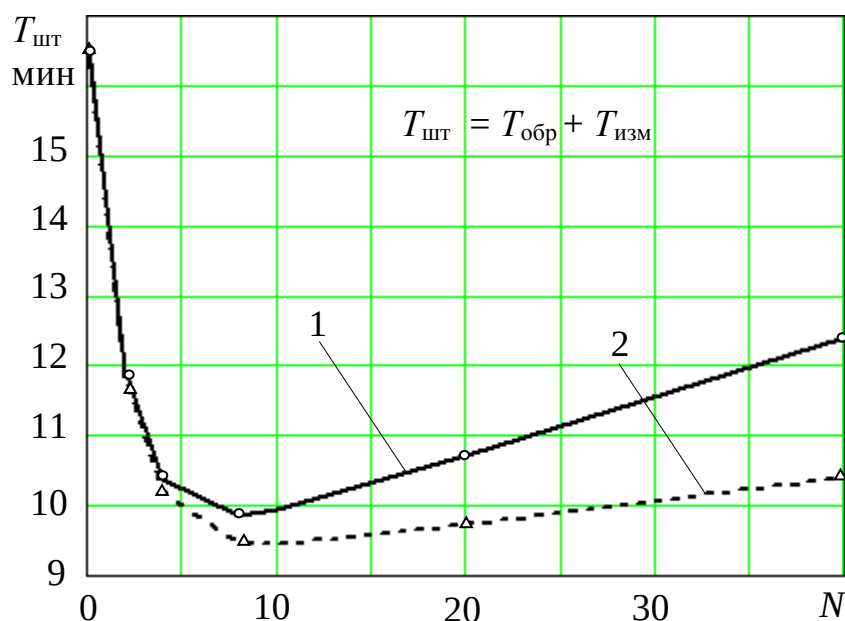


Рис.3 – Изменение штучного времени зубошлифования в зависимости от числа измерений припуска во впадинах ЗК: 1 и 2 – время измерения припуска в одной впадине 5 секунд и 2 секунды, соответственно

Описанный способ восстановления сигнала, характеризующего величину припуска во впадинах, которые были пропущены при измерениях, позволяет существенно уменьшить число необходимых измерений для выявления припуска во всех впадинах ЗК (по правой и левой стороне каждой впадины). Показано, что общее время операции зубошлифования, состоящее из времени наладки (время на измерение припуска $T_{изм}$) и времени обработки

(время зубошлифования $T_{обр}$) имеет минимальное значение при оптимальном числе измерений припуска (рис.3).

Список литературы

1. Лищенко Н.В. Настройка станков при зубошлифовании по методу копирования / Н.В. Лищенко, А.Н. Ковальчук, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Междунар. науч.- практ. конференции. – Д.: ЛИРА, 2015. – С.39-45.

2. Лищенко Н.В. Анализ распределения припуска по профилю впадины при зубошлифовании / Н.В. Лищенко, В.В. Нежебовский, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Междунар. науч.- практ. конф. – Д.: ЛИРА, 2015. – С.45-48.

3. А.с. 812546 СССР, МКИЗ В 24 В 49/10. Способ настройки резбошлифовального станка / Ю.П. Русавский, А.В. Якимов, В.П. Ларшин и др. (СССР). – 2784708/25-08; заявл. 25.06.79; опубл. 15.03.81, Бюл. № 10.

4. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход), под ред. А.А. Первозванского / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с.

Аннотация. На основе предварительно полученных экспериментальных данных по измерению припуска за зубошлифование методом копирования на станке HOFLEER RAPID 1250 выполнен анализ влияния числа измерений припуска по периферии заготовки зубчатого колеса на штучное время операции. С уменьшением числа измерений уменьшается время на измерение, но увеличивается время на обработку, так как с увеличением неопределённости припуска выполняют отвод круга от заготовки во избежание появления шлифовочных прижогов.

Ключевые слова: оптимизация, зубошлифование, профильный шлифовальный круг, измерение припуска, частотное преобразование Фурье, теорема отсчётов, восстановление сигнала о припуске, штучное время операции.

С.И Кожевников, В.Ф Макаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРАТЕГИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРЕСС-ФОРМ

Макаров Владимир Федорович, д-р техн. наук, проф., makarovv@pstu.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Кожевников Сергей Игоревич, аспирант, kozhevnikovsergeyigorevich@gmail.com, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ООО «ПК ДЭМИ»

Kozhevnikov S.I, Makarov V.F

Makarov Vladimir Fedorovich, Dr. Sc. Sciences, prof., makarov@pstu.ru, Russia, Perm, Perm National Research Polytechnic University

Kozhevnikov Sergey Igorevich, a graduate student, kozhevnikovsergeyigorevich@gmail.com, Russia, Perm, Perm National Research Polytechnic University, ООО «PK DAMI»

Abstract: The quality of the mold surface has a direct impact on the number of manufactured parts. The most common is high-speed processing forming parts of molds, as the material of the workpiece already has been heat-treated. Practical experience shows that the milling path has a great influence on the durability of molds, which is characterized durability and quality mold parts. This article shows the influence path CNC machining during high-speed milling on the durability of molds. In some cases, the correct milling path can significantly increase the molds durability.

Key words: CNC machining, mold, milling path.

Для изготовления деталей из полимеров применяют групповые пресс-формы для литья под давлением. Это обусловлено тем, что этот метод позволяет серийно изготавливать изделия сложной конфигурации, обеспечивая при этом требуемую точность, а также получать тонкостенные отливки с отклонением от заданного размера не более 0,5% и шероховатостью $Ra_{2,5-5}$ мкм. Пресс-форма или ее отдельные элементы должны быть выполнены

строго по чертежам, а шероховатость на профилирующих поверхностях должна соответствовать $Ra_{0,32-0,63}$ мкм.

При фрезеровании существует множество разных форм стратегий фрезерования, так как стратегия фрезерования определяется параметрами обрабатываемой детали и параметрами резания таким как: скорость, скорость подачи, глубина резания и шаг, которые зависят от используемого инструмента и оборудования. Во время фрезерования траектория инструмента определена относительно возможности станка, а от режущего инструмента зависит качество поверхности. В дополнении к качеству поверхности измеренной шероховатостью есть и другие свойства поверхности, которые характеризуют обрабатываемую деталь. Эти свойства поверхности являются следствием траектории фрезерования.

Необходимо обратить внимание на направление и характер и гребешков особенно при фрезеровании сферическим инструментом по криволинейной траектории. Направление гребешка зависит от направления траектории, а высота и форма гребешка зависит от формы обрабатывающего фрезерного инструмента и технологических параметров (рис.1). Основываясь на опыте, программист-технолог может идентифицировать успешную стратегию для конкретной формы или характеристики поверхности, с точки зрения качества поверхности.

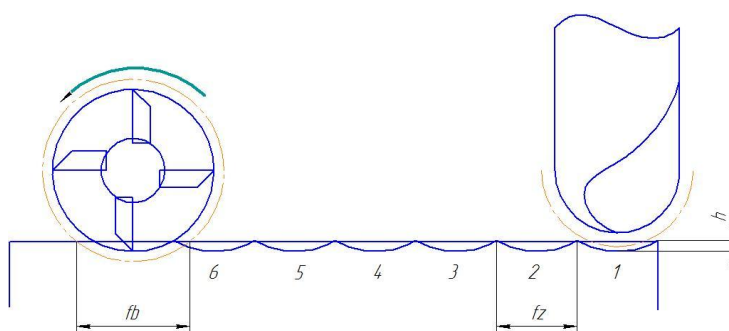


Рис. 1 Параметры формирования гребешка

f_b - величина биения, f_z - величина подачи, h - высота гребешка

$$h = \frac{f_z}{4D}, \text{ где } D - \text{диаметр обрабатывающего инструмента.}$$

Обработка поверхности пресс-форм может быть различной в зависимости от вида обработки. Что касается стратегии обработки поверхности при фрезеровании, мы различаем:

- а) линейное фрезерование,
- б) круговое фрезерование,
- в) трохоидальное фрезерование,
- г) обработка по Z координате.

В большинстве случаев круговая обработка используется для фрезерования круглых, овальных, сферических форм. Плоские поверхности чаще обрабатывают линейными траекториями, которые могут быть ориентированы под разными углами или трохоидальным способом фрезерования. Обработка по Z координате подходит для фрезерования плоскостей или криволинейных поверхностей.

Для увеличения долговечности пресс-формы, траектория фрезерования должна располагаться параллельно главному вектору скорости движения литейной массы. Влияние траектории окончательной обработки на долговечность обработанной поверхности главным образом зависит от направления гребешков и шероховатости обработанной поверхности.

Направление потока материала в пресс-форме (рис. 2) может быть определено на основе технологического анализа, для конкретного продукта в САЕ-системах. Определение потока материала является основой для определения стратегии фрезерования во время обработки, а также может влиять на технологию производства пресс-формы и ее конструкцию. В процессе анализа проливаемости детали в системах инженерного анализа САЕ. Получаем модель литниковой системы в которой указано направление движения расплава в каждой детали литниковой системы.

По движению расплава, указанному на рис. 2, можно определить главный вектор движения литейной массы. На основании выбранного главного вектора принимаем решение о формировании траектории обработки.

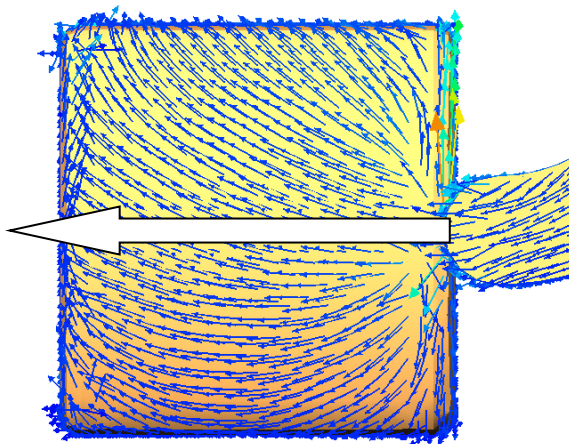


Рис. 2. Определение главного вектора движения литейной массы

Эксперимент был подготовлен для формообразующих пуансона и матрицы пресс-формы. Фрезерование поверхностей инструментом осуществлялось с помощью формирования линейного рельефа фрезерования под углом 90° и 0° по отношению к главному вектору скорости движения литейной массы. Траектория движения инструмента менялась на формообразующей поверхности, указанной на рис. 4.

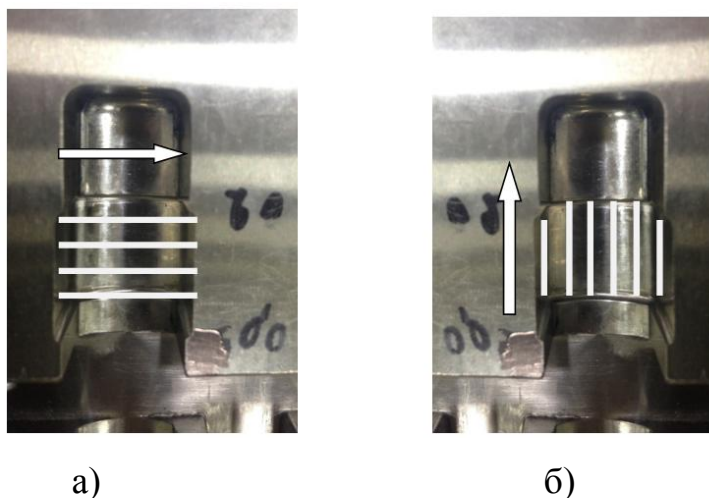


Рис. 4. а) формирование линейного рельефа фрезерования под углом 0° по отношению к главному вектору скорости движения литейной массы

б) формирование линейного рельефа фрезерования под углом 90° по отношению к главному вектору скорости движения литейной массы

Обе фрезерные операции проводились инструментом с одинаковыми параметрами. В пресс-форме одни восемь гнезд были обработаны по одной программе, а другие восемь по другой. При экспериментальном запуске пресс-формы были сделаны замеры, указывающие на проливаемость в

зависимости от угла линейного рельефа фрезерования по отношению к главному вектору скорости движения.

Результаты этого эксперимента показали, что формирование линейного рельефа фрезерования под углом 0° по отношению к главному вектору скорости движения литейной массы дает лучшие результаты проливаемости. Изменение фрезерной стратегии дало результат улучшив проливаемость деталей на 25%, что напрямую влияет на долговечность пресс-формы.

Стоит отметить что эксперимент является не полным и в дальнейшем планируется проанализировать не менее 10 пресс-форм различной сложности и конфигурации с обработкой различными траекториями движения инструмента с целью определить влияние стратегии фрезерования на долговечность пресс-форм.

Список литературы

1. Тимирязев В.А. Управление точностью и производительностью процессом механообработки на многоцелевых станках с ЧПУ. Тимирязев В.А., Кутин А.А., Гололобова А.А., Кареев Ю.А. Монография. МГТУ «Станкин». М. 2013. 50 с.
2. Справочник конструктора - инструментальщика / Баранчиков В.И., Боровский Г.В., Гречишников В.А. / Под общей редакцией В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1994. 558с.
3. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как делать литьевые формы/ Пер. с англ. яз. под ред. В.Г. Дувидзона, Э.Л. Калинчева. - СПб.:Профессия, 2007. 640 с.
4. Мэллой Р.А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / Пер. с англ. яз. под. ред. В.А. Брагинского, Е.С. Цобкалло, Г.В. Комарова - СПб.: Профессия, 2006. 512 стр.
5. Вэй Пью Маунг. Эффективность комплексной технологии изготовления деталей сложной геометрии на современных многоцелевых станках / Тимирязев В.А., Хостикоев М.З., Дудко С.В., Таиров И.Е., Вэй Пью Маунг. // Ж. Технология машиностроения №11, 2014.

**Анализ динамических процессов в шпиндельных
устройствах шлифовальных станков**

Зубарев Юрий Михайлович –д.т.н., профессор кафедры «Технологические процессы и оборудование автоматизированных машиностроительных производств» (ТПиОАМП) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

Алейникова Маргарита Анатольевна – к.т.н., доцент кафедры «Технологические процессы и оборудование автоматизированных машиностроительных производств» (ТПиОАМП) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

Санкт-Петербург, Россия, *E-mail:* tmioap@zavod-vtuz.ru

Аннотация

Приведён анализ динамических процессов в основном узле плоскошлифовальных станков, а именно - шпиндельном устройстве. Рассматриваются два основных класса неконсервативных сил, - составляющие силы резания и диссипативные силы. Предлагается неконсервативная динамическая модель шпиндельного устройства, анализ которой позволяет определить условия устойчивости режимов шлифования, оценить возбуждаемые формы колебаний и решить задачи их синтеза.

Ключевые слова: станок, шпиндельное устройство, колебания, динамическая устойчивость, частотные характеристики, коэффициент трения, модель, неконсервативные силы, составляющие силы резания.

Для анализа динамической устойчивости шпиндельных устройств плоскошлифовальных станков, а также для оценки уровня и формы возбуждаемых колебаний требуется принимать во внимание влияние неконсервативных сил, приложенных к упруго-диссипативной системе шпиндельного устройства.

В данной работе рассматриваются два основных класса неконсервативных сил. Это составляющие силы резания и диссипативные силы.

Для задания составляющих силы резания на практике часто используют степенные зависимости или динамические характеристики резания. Так, например, принято считать, что на консоли к шпинделю станка приложены гармоническая сила:

$$F = F_0 \cdot \sin pt \quad (1)$$

Рассматривая вынужденные колебания шпинделя под действием этой силы, можно определить деформацию на консоли:

$$\gamma_0 = A_0 \cdot \sin(pt - \gamma_0) \quad (2)$$

Амплитуда колебаний A_0 и фазовый сдвиг γ_0 являются важнейшими динамическими характеристиками системы. Варьируя частоту возмущающей силы P , можно построить амплитудно-фазовую частотную характеристику шпиндельного узла, которая позволяет судить о динамическом качестве системы и может быть использована для расчёта устойчивых режимов резания на станке. По амплитудно-фазовой частотной характеристике можно оценить амплитуду колебаний для некоторых режимов работ, особенно в тех случаях, когда сила резания может быть представлена как заданная функция времени (например, при шлифовании с неравномерным припуском, при определении колебаний от инерционных силы несбалансированных масс и пр.).

Если рассматриваемая система считается линейной, то не составляет трудностей определить амплитуды и фазы колебаний всех точек и построить упругие линии шпинделей в случае полигармонического возбуждения или в случае произвольного возбуждения [1].

В рамках линейной теории также возможно произвести анализ динамической устойчивости станков при резании и построить области устойчивости. Динамическая характеристика резания связывает изменение силы резания с колебанием толщины срезаемого слоя. Наиболее представительной оказывается динамическая характеристика, которая

описывает процесс шлифования линейным апериодическим звеном первого порядка [3,5]:

$$\dot{O}_p \dot{p} + p = -k_x x \quad (3)$$

Однако, оставаясь в рамках линейно теории, приходится ограничиваться только задачей устойчивости. Процесс резания с достаточно малыми амплитудами с практической точки зрения может считаться устойчивым, хотя невозмущённое движение исходной системы будет неустойчивым, согласно теории Ляпунова.

Для оценки же самих амплитуд колебаний необходим учёт нелинейных факторов, которые содержатся как в процессе резания, так и в упругой системе. На наш взгляд, необходим всесторонний учёт демпфирующих сил, которые образуют вторую группу неконсервативных сил в шпиндельных устройствах.

Наиболее распространён метод учёта диссипативных сил, основанный на следующих допущениях [2]: «... физическая природа диссипативной силы, форма зависимости её величины от параметров движения не имеют существенного значения; в конечном счёте, всё определяется средней мощностью силы сопротивления, т.е. количеством энергии, рассеиваемой в единицу времени. Оценка средней мощности может быть произведена экспериментально на основе анализа петли гистерезиса».

Удобной количественной характеристикой оказывается относительное рассеивание энергии, или коэффициент поглощения Ψ , равный отношению энергии, накопленной в системе за этот период.

При построении частотных характеристик упругой системы проводится линеаризация нелинейных диссипативных сил по частоте возмущающей силы [4], после чего в каждом упруго-диссипативном элементе считается известным линеаризованный коэффициент вязкого трения, что даёт необходимую информацию для построения линеаризованной диссипативной матрицы.

При введении диссипативных сил в консервативную динамическую модель ставится задача – по частным диссипативным характеристикам конструктивных элементов (втулок, опор, материала изделий) построить неконсервативную динамическую модель шпиндельного устройства и на основании анализа модели выявить условия устойчивости резания, определить возбуждаемые формы колебаний и решить задачи синтеза.

В дальнейшем изложении при построении линеаризованной диссипативной матрицы шпиндельного устройства полагаем известными коэффициенты вязкого трения в опорах и во втулках. Эквивалентные коэффициенты вязкого трения в опорах и во втулках определяем в соответствии с известной методикой [4], по частоте возмущающей силы:

$$b_j^* = \frac{1}{2} \psi_j c_j / (\pi \rho) \quad (4)$$

где b_j^* – линеаризованный коэффициент вязкого трения в j -том упругодиссипативном элементе; ψ_j – коэффициент поглощения в j -той опоре;

$\tilde{n}_j$ – жёсткость j -той опоры; δ – частота возмущающей силы. При построении диссипативной матрицы полагаем, что диссипативные силы слабо влияют на форму колебаний шпинделей.

Связь между элементами диссипативной матрицы b_{ij} и элементами b_j может быть установлена из сопоставления функции Рэлея для рассматриваемой системы:

$$\Phi_\delta = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^s b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (5)$$

и функции, характеризующей фактическое рассеяние в демпфирующих элементах системы:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M b_j^* v_j^2 \quad (6)$$

где v_j - скорость колебаний в j -том упруго-диссипативном элементе, s – число степеней свободы, M - число упруго-диссипативных элементов.

Сравнивая выражения Φ и Φ_p , можно установить связь между элементами диссипативной матрицы b_{ij} и элементами вектора линеаризованных коэффициентов рассеяния $\{b_j^*\}$

$$b_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M b_k^* \Delta_i(z_k) \Delta_j(z_k), i, j = \overline{1, s} \quad (7)$$

где z_k - безразмерные координаты упруго-диссипативных элементов, $\Delta_{i,j}(z_k)$ - коэффициенты перехода, зависящие от геометрических, инерционных и упругих параметров системы.

Если для гармонической возмущающей силы заданной частоты построена линеаризованная диссипативная матрица, то на основе анализа системы могут быть построены частотные характеристики шпиндельного устройства:

$$\tilde{A} \ddot{Q}^* + B(p) \dot{Q}^* + \tilde{C} Q^* = F_1^* \cos pt + F_2^* \sin pt \quad (8)$$

где $\tilde{A}, \tilde{C}$ - инерционная и инерционная матрицы системы [1], а через $F_{1,2}^*$ обозначены векторы-столбцы размерности s :

$$F_1^* = \|f_1', f_2', \dots, f_s'\|; \quad F_2^* = \|f_1'' f_2'', \dots, f_s''\|.$$

Для расчёта частотных характеристик обычно полагают $f_1' \neq 0$; $f_i' = 0$; при $i \neq 1$, $f_i'' = 0$.

Решение системы (8) получаем в виде:

$$Q^* = X^* \cos pt + Y^* \sin pt \quad (9)$$

где X^* и Y^* - векторы порядка s .

Подставляя соотношение (9) в выражение (8) получаем для векторов X^* и Y^* систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} (\tilde{C} - \tilde{A}p^2)X^* + \tilde{B}(p)pY^* &= F_1^* \\ (\tilde{C} - \tilde{A}p^2)Y^* + \tilde{B}(p)pX^* &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Из этой системы можно получить:

$$X^* = \frac{1}{2} \tilde{B}^{-1}(p)(\tilde{C} - \tilde{A}p^2) \left\{ \frac{1}{p} (\tilde{C} - \tilde{A}p^2) \tilde{B}^{-1}(p)(\tilde{C} - \tilde{A}p^2) + \tilde{B}(p)p \right\}^{-1} F_1^* \quad (11)$$

$$Y^* = \left\{ \frac{1}{p} (\tilde{C} - \tilde{A}p^2) \tilde{B}^{-1}(p)(\tilde{C} - \tilde{A}p^2) + \tilde{B}(p)p \right\}^{-1} F_1^* \quad (12)$$

Условие резонанса:

$$\tilde{C} - \tilde{A}p^2 = 0$$

Позволяет оценить резонансные амплитуды:

$$X^* = 0, \quad Y^* = \frac{1}{p} \tilde{B}^{-1}(p) F_1^* \quad (13)$$

Выражение (13) удобно для практических расчётов, поскольку в нём следует однократно применять матрицу не высокого порядка. На практике обычно это мало используется, так как наибольший интерес представляет амплитуда колебаний массы шпинделя.

В этом случае достаточно определит только элемент $b_{11}^{-1}(p)$ обратной диссипативной матрицы. Тогда резонансная амплитуда консольной массы при действии единичной силы (динамическая податливость) будет равна:

$$e_{q1}(p) = p^{-1} b_{11}^{-1}(p) \quad (14)$$

Коэффициент динамичности при резонансе:

$$\mu = c p^{-1} b_{11}^{-1}(p) \quad (15)$$

где $\bar{n}$ - статическая жёсткость шпиндельного устройства, приведённая к консоли.

Отметим, что непосредственное использование формул (11) и (12) для построения амплитудно-фазовых частотных характеристик связано с определёнными вычислительными трудностями, т.к. на каждом шаге требуется производить действия с определителями высокого порядка. Представляется целесообразным для облегчения расчётов в этом случае переходить к нормальным координатам.

Нормальные координаты системы n_j вводятся с помощью соотношений:

$$q_i = \sum_{j=1}^s \varsigma_{ij} \eta_j, \quad i = \overline{1, s} \quad (16)$$

где ς_{ij} - коэффициенты формы, которые подчиняются условию ортогональности:

$$\sum_{i=1}^s \varsigma_{ij} \varsigma_{im} = 0 \quad j \neq m \quad (17)$$

И определяются из анализа консервативной системы [1].

В нормальных координатах движение системы описывается следующей системой уравнений:

$$\ddot{\eta}_j + 2h_j \dot{\eta}_j + \omega_j^2 \eta_j = (F_1 \varsigma_{1j}) / \left(\sum_{i=1}^s m_i \varsigma_{ij}^2 \right), \quad j = \overline{1, s} \quad (18)$$

где F_1 - сила, приложенная на консоли шпиндельного устройства.

Коэффициенты вязкого трения для нормальных координат могут быть выражены через линеаризованные коэффициенты b_k^*

$$2h_j = \frac{1}{m_1} \left[\sum_{k=1}^i b_k^* \Delta_1(z_k) \Delta_\nu(z_k) \varsigma_{vj} \right], \quad j = \overline{1, s} \quad \nu = \overline{1, s} \quad (19)$$

где M – число упруго-диссипативных элементов.

Используя принцип суперпозиции, можно записать закон изменения принятых обобщённых координат $q_i(t)$ при действии произвольной силы $F(t)$ в следующем виде:

$$q_i = \sum_{j=1}^s \varsigma_{ij} \left[e^{-h_j t} A_j \sin(\tilde{\omega}_j t - a_j) + \int_0^t F(\xi) e^{-h_j(t-\xi)} \sin \tilde{\omega}_j(t-\xi) d\xi \right] / \left(\tilde{\omega}_j \sum_{j=1}^s m_j \varsigma_{ji}^2 \right) \quad (20)$$

$$\text{где } \tilde{\omega}_j = \omega_j^2 - h_j^2$$

При известных упругих и диссипативных характеристиках опор и из условия баланса энергии может быть определён коэффициент поглощения в ξ -той форме колебаний согласно соотношению:

$$\psi_\xi = \frac{1}{c_\xi^*} \sum_{k=1}^i c_k \psi_k (a_\xi \lambda_{\xi k}) \lambda_{\xi k}^2 \quad (21)$$

где a_ξ – амплитуда ξ -той формы; c_ξ^* – обобщённая жёсткость системы для ξ -той нормальной координаты, которая так же, как и величина $\lambda_{\xi k}$ зависит от параметров шпиндельного устройства [4], M – число упругости диссипативных элементов.

Выводы.

1. Предлагаемая неконсервативная динамическая модель шпиндельного узла станка позволяет оценить возбуждаемые формы колебаний и решить задачи их синтеза.

2. Приведённый анализ динамических процессов в шпиндельном узле плоскошлифовального станка позволяет определить условия устойчивости процесса обработки и тем самым повысить его эффективность.

Список литературы

1. Вейц В.Л., Максаров В.В. Динамика технологических систем механической обработки резанием. Монография в 5-ти частях. Ч.2. Динамические модели технологических систем и приводов станков. – СПб.: СЗТУ-ПИМаш, 2001. – 164 с.
2. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов. – Л.: Машиностроение, 1969. – 268 с.
3. Вейц В.Л., Васильков Д.В., Зубарев Ю.М. Динамика технологических систем. Монография в 2-х частях. Ч.2. Колебания в металлорежущих станках. – СПб.: Изд-во ПИМаш, 2002. – 256 с.
4. Вейц В.Л., Максаров В.В., Лонцких П.А. Динамические процессы, оценка и обеспечение качества технологических систем механической обработки. – Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 199 с.
5. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Устойчивость процесса шлифования с учётом его динамических характеристик. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2016. – 388 с.

Yu.M. Zubarev, M.A. Aleynikova

An analysis of dynamic processes in spindle devices of polishing machine-tools

Abstract.

The work considers two basic classes of non-conservative forces: a) cutting forces; b) dissipative forces. The dynamic model of spindle device is built, that allows on the basis of analysis of the model to expose the terms of cutting stability, define the excited forms of vibrations and decide the tasks of synthesis.

Keywords: spindle feed device, nonconservative forces, fluctuations, dynamic stability, absorption coefficient, frequency characteristics, coefficient of friction, dissipation matrix.

УДК 621.9

Зубарев Ю.М., Круглов А.И.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО
РАЗРАБОТКЕ ПРОЦЕССОВ ИОННО-ВАКУУМНОЙ
МОДИФИКАЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ
ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ**

Зубарев Юрий Михайлович, д.т.н., профессор

Круглов Андрей Игоревич, к.т.н., доцент

Санкт-Петербург, Россия, E-mail: andoscar@yandex.ru

Аннотация. Приводятся рекомендации по разработке технологических процессов ионно-вакуумной обработки инструментов, основанные на анализе и синтезе базовых процессов ионной обработки, которые могут быть использованы при внедрении в производство технологий упрочнения поверхностного слоя режущих инструментов.

Ключевые слова. Моделирование процессов ионно-вакуумная обработка, твердые сплавы, поверхностный слой, имплантация, модификация, распыление.

TECHNOLOGICAL ADVICE ON DEVELOPING PROCESSES OF ION-VACUUM INSTRUMENTS MODIFICATION OF CERAMIC HARD ALLOYS.

Abstract. Provides guidance on the development of technological processes of ionic-vacuum instruments, based on the analysis and synthesis of the basic processes of ion processing, which can be used when embedded in the production technology of hardening surface layer cutting tools.

Keywords. Numerical simulation of ionic-vacuum processing, hard alloys, surface layer, implantation, modification, dispersion.

Улучшение эксплуатационных характеристик инструментов, таких как износо-, тепло-, коррозионная стойкость, твёрдость, микрорельеф поверхностей и др., является одним из направлений повышения ресурса и надёжности их работы. Такие важные эксплуатационные показатели работоспособности инструментов, как долговечность (износостойкость) и безотказность в работе (растрескивание и выкрашивание режущей кромки) в значительной степени определяются качеством их поверхностных слоёв. Именно в этих слоях зарождаются и развиваются процессы термической и механической усталости, пластической деформации, истирания и коррозии, приводящие к снижению производительности процессов обработки и качества выпускаемой продукции. Формирование высококачественных рабочих поверхностных слоёв является одним из наиболее эффективных средств повышения работоспособности режущих инструментов.

В настоящее время существует достаточно много способов, изменяющих свойства поверхности режущей части инструментов. Наряду с традиционными способами повышения эксплуатационных свойств, такими как термическая, химикотермическая и др. в настоящее время всё большее применение получает обработка изделий в вакууме с использованием энергии пучков ускоренных и ионов и атомов или ионно-вакуумной модификации (ИВМ).

Для успешной реализации способов ИВМ в инструментальной промышленности необходимо знать теплофизические характеристики инструментальных материалов, а также технологические параметры способов взаимодействий, а также как общие так и конкретные (для данного материала инструмента, вида инструмента и т.п.) технологические рекомендации.

Ниже приводятся рекомендации по разработке технологических процессов ионно-вакуумной модификации (ИВМ) поверхностного слоя инструмента из металлокерамических твердых сплавов, основанные на анализе и синтезе базовых процессов ионной обработки [1,2], а также на многочисленных экспериментальных данных, выполненными авторами [3,4,5].

Основополагающие положения технологических рекомендаций можно сформулировать следующим образом:

1. На основе анализа эксплуатационных и связанных с ними физико-механических и химических свойств изделий, моделирования процессов взаимодействия ионов с материалом инструмента и прогнозирования существования и свойств соединений, образующихся при этом, сначала определяются структура, химический и фазовый составы модифицированного слоя. Затем определяются параметры парогазовой среды, являющейся инструментом для ионной обработки, абстрагируясь от конкретных процессов получения этих параметров. И только после этого на основе анализа и синтеза базовых способов ионной обработки разрабатывается комбинированный техпроцесс для обеспечения требуемых параметров парогазовой среды.

2. При синтезе базовых процессов ионной обработки и разработке на их основе комбинированного техпроцесса должна решаться задача оптимизации целевой функцией целью которой могут быть минимум затрат, наибольшая

производительность и др. с учетом особенностей производства данного предприятия, требований концентрации оборудования для реализации способов на одном рабочем месте, радиационной безопасности, экологии и др.

3. Энергию процессов, происходящих при эксплуатации изделий, необходимо учитывать как один из факторов, формирующих требуемое качество инструментов во время их работы.

4. Не всегда следует получать требуемого качества «как можно больше». Например, чрезмерное упрочнение поверхности за счет ионной обработки в некоторых случаях приводит к отрицательному эффекту – снижению работоспособности инструмента. Оптимизацию процесса получения прогнозируемого качества следует производить, исходя из требуемого ресурса работы либо стойкости изделия.

При проектировании операций ИВМ предлагаются следующие стадии ее разработки:

1. Выбор структуры поверхностного слоя, химических элементов и соединений для формирования слоев предложенной структуры. Оценка свойств функциональных слоев модифицированного поверхностного слоя.

2. Выбор базовых способов ионно-вакуумных воздействий и определение их параметров для операции ИВМ по переходам: распыление, формирование переходного слоя, нанесение функциональных слоев покрытия.

3. Составление маршрутного технологического процесса ионной обработки, исходя из операций по входному контролю, очистке поверхностей инструментов, подлежащих модификации, самой операции ИВМ и операций по контролю качества ионной обработки.

4. Составление технологической документации на операции и переходы.

При разработке содержания технологической операции ионно-вакуумной модификации инструментов следует:

А. Рассматривать переход «распыление поверхности» в операции ионно-вакуумной обработки не только как средство очистки поверхности в вакууме от адсорбированных газов и загрязнений и подготовки ее к нанесению покрытия, но и как один из самостоятельных способов размерной ионно-вакуумной модификации, автоматически выявляющий и удаляющий дефекты поверхностного слоя. Исходя из этого, по возможности принимать толщину распыляемого слоя равной или больше толщины дефектного слоя, зависящей от предшествующих операций изготовления изделий;

В. Используя низкоэнергетическую ионную имплантацию, формировать переходную зону между основным материалом и покрытием, повышающую адгезионную прочность последнего;

С. Выбирать способ нанесения покрытия, исходя из теплостойкости инструментального материала и назначения инструмента. Ограничивать предельно допускаемую температуру нагрева при ИВМ величиной на 50...100 градусов ниже теплостойкости инструментального материала.

При этом проектировании содержания операции ИВМ надо:

1. Во всех случаях первым переходом операции ИВМ должно быть распыление дефектного поверхностного слоя. Иногда этот переход называют «ионно-вакуумная очистка поверхности». Назначение этого перехода:

- получение на поверхности материала основы стехиометрии, определяемой химической формулой сплава основы;
- активизация поверхностных атомов в кристаллической решетке;

– удаление поверхностного слоя, содержащего дефекты (трещины, поры, примесные адсорбированные атомы, молекулы и др.), которые в дальнейшем могут стать зародышами (очагами) разрушения при эксплуатации инструмента.

2. Содержание второго перехода технологической операции ИВМ – создание переходного модифицированного слоя между основной и последующими подслоями покрытия. Назначение переходного слоя – плавное изменение физико-механико-химических свойств от основы к покрытию. Такой переходный слой определяет хорошую адгезию покрытия к материалу изделия. В некоторых случаях созданный на данном переходе модифицированный слой может быть внешним рабочим слоем инструмента, непосредственно контактирующим с поверхностью заготовки при ее обработке.

3. Назначение последующих переходов операции ИВМ – формирование композитного покрытия, состоящего из набора функциональных подслоев, обеспечивающих требуемые физико-химико-механические и эксплуатационные свойства изделия, такие, как твердость, пластичность, отсутствие сродства к обрабатываемому материалу, износо- и коррозионная стойкости, теплопрочность и др. Перечень требуемых свойств определяется в каждом конкретном случае, исходя из анализа условий работы инструмента, материала и свойств обрабатываемой заготовки, причин «потери» инструментом работоспособности, т.е. выхода из строя.

В качестве способов ионно-вакуумной обработки для реализации разработанной структуры операции ИВМ рекомендуется осуществлять распыление дефектного поверхностного слоя путём бомбардировки поверхности ионами инертных газов, чаще всего – ионами аргона. При этом

следует использовать схемы ионно-плазменного и ионно–лучевого травления.

Для формирования переходного слоя следует применять низкоэнергетическую ионную имплантацию с энергией ионов 20...40 КэВ.

Конкретные рекомендации по выбору способов ИВО сведены в табл.1

Для реализации технологической операции ионно-вакуумной модификации целесообразно использовать промышленное оборудование для нанесения ионно-вакуумных покрытий. Оно должно обладать способностью реализовывать те способы обработки, которые выбраны по изложенным выше рекомендациям для осуществления технологических переходов ионно-вакуумной операции. К этому оборудованию, кроме указанных стандартных функций, следует предъявлять следующие дополнительные требования:

- локализовать тлеющий разряд на обрабатываемых поверхностях;
- обеспечить высокую скорость распыления модифицируемых поверхностей;
- обеспечить верхнюю границу абсолютной величины ускоряющего ионы напряжения не менее 12...20 КВ;
- осуществлять регулирование степени ионизации парогазового потока, идущего на обрабатываемые поверхности;
- предусмотреть возможность относительного перемещения модифицируемых изделий и источников парогазового потока.

Таблица 1

Способы ионно-вакуумной обработки, рекомендуемые для реализации технологических переходов операции ИВМ

Содержание перехода операции ИВМ	Особенности формы обрабатываемых поверхностей и тип модифицирующих элементов	Способ ионно-вакуумной обработки
Распыление дефектного поверхностного слоя	Поверхности простой формы (плоскости, тела вращения)	Ионно-плазменное травление по диодной схеме в атмосфере инертного газа
	Сложные фасонные поверхности	Ионно-плазменное травление по триодной схеме в атмосфере инертного газа
	Участки поверхности для селективного травления	Ионно-лучевое травление; Ионно-плазменное травление по триодной схеме с применением защитных масок
	Канавки, пазы	Ионно-лучевое травление
Формирование переходного подслоя	Модифицирующие элементы – газové ионы	Ионная имплантация с использованием высокочастотных источников газовых ионов
	Модифицирующие элементы – ионы твердых веществ, в т.ч. металлов	Термоионное осаждение покрытия с дополнительной ионизацией паров модифицирующих металлов и ускорением ионной фазы ($E > 15 \dots 20$ КэВ)
Формирование однослойного функционального покрытия	Состав покрытия – чистые металлы и соединения со стехиометрией состава материала катода	Конденсация покрытий в условиях ионной бомбардировки (метод КИБ) в атмосфере инертного газа
		Нанесение покрытия с помощью магнетронной распылительной системы (МРС) в атмосфере инертного газа
	Состав покрытия – сплавы и соединения, формируемые на обрабатываемой поверхности	Метод КИБ в атмосфере реактивного газа
		Нанесение покрытия с помощью МРС в атмосфере реактивного газа
Формирование многослойного функционального покрытия	Состав подслоев покрытия – чистые металлы, и соединения со стехиометрией состава материалов катода	Метод КИБ с применением дополнительного катода в атмосфере инертного газа
		Нанесение покрытия с помощью МРС с секторным катодом в атмосфере инертного газа
	Состав подслоев покрытия – сплавы и соединения, формируемые на обрабатываемой поверхности	Нанесение композитного покрытия с помощью МРС с секторным катодом в атмосфере реактивного газа
		Нанесение подслоев покрытия с помощью последовательного использования МРС с калцевым или прямоугольными катодами в атмосфере реактивных газов.

Выводы.

1. Выполненные в лабораториях СПбПУ экспериментальные исследования, а также производственные испытания, на предприятиях Санкт-

Петербурга подтверждает правильность предложенных в статье научных положений и технологических рекомендаций по формирования с помощью ионно-вакуумной обработки рациональной структуры поверхностных слоев твердосплавных инструментов, обеспечивающей направленное изменение их химического состава, повышение микротвердости, улучшение параметров микропрофиля поверхности, удаление поверхностных дефектов и отвод тепла от режущей кромки.

2. Данные технологические рекомендации рекомендуются для использования на предприятиях машиностроительного комплекса РФ.

Список литературы.

1. Брюхов В.В. Повышение стойкости инструмента методом ионной имплантации. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. - 120 с.
2. Зубарев Ю.М. Современные инструментальные материалы. – СПб: Изд-во «Лань», 2014. - 304 с.
3. Сенчило И.А. Технология обработки с использованием потоков высокоэнергетических частиц/ И.А. Сенчило, Ю.М. Зубарев, А.И. Круглов, Н.Н. Ревин. – СПб:Изд-во ПИМаш, 2004. – 116 с.
4. Зубарев Ю.М. Систематический подход к подбору имплантирующих элементов при ИВМ путём создания алгоритма / Ю.М. Зубарев, А.И. Круглов. –СПб «Известия Волгоградского государственного технического университета». Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 9, № 7 (110), 2013.- с. 22-25.
5. Зубарев Ю.М. Ионно-вакуумная модификация – эффективный метод повышения эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента. /Ю.М. Зубарев, А.И. Круглов, М.А. Афанасенков. – СПб «Инновации на транспорте и в машиностроении», Том 3 «Технологические процессы в машиностроении», СПб: НМСУ «Горный», 2015. с.5-9.

Раздел 2

Инженерия высококачественных поверхностей и кромок

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ ПОВЫСИТЬ
КАЧЕСТВО МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ФРЕЗЕРОВАНИЯ**

Александр Евгеньевич Мешкас,

аспирант ФГБОУ «ПНИПУ», начальник производственно-диспетчерского
отдела АО «ПЗ «Машиностроитель», Россия, г. Пермь, a-meshkas@mail.ru, т.
89638777227

Владимир Федорович Макаров,

зам. заведующего кафедрой, доктор технических наук, профессор, академик
РАЕ ФГБОУВО «ПНИПУ», Россия, г. Пермь, makarovv@pstu.ru,
т.89124915014

Виталий Владимирович Ширинкин,

аспирант ФГБОУ «ПНИПУ», начальник отдела управления качеством АО
«ПЗ «Машиностроитель», Россия, г. Пермь, т. 89091002247

Аннотация: Данная работа направлена на представление основных проблем, возникающих при механической обработке (сверлении, разрезке, точении, фрезеровании) деталей из современных высокопрочных полимерных композиционных материалов, применяемых в авиастроении и в специальном машиностроении. В данной работе проведено экспериментальное исследование различных методов обработки ПКМ методом фрезерования. Представлены пути повышения производительности процесса разрезки ПКМ.

Ключевые слова: обработка, полимерные композиционные материалы, качество, сверление, гидроабразивная резка, разрезка, точение, фрезерование, дефекты, проблемы, анизотропия свойств, волокна, режущий инструмент, стойкость инструмента, осевая сила.

Объемы производства и использования ПКМ во всех странах увеличиваются. Производство композитов в США с 2000-2015 увеличивалось 35-40% ежегодно и сегодня продолжается аналогичная динамика. Очень быстро увеличиваются темпы производства деталей из композитов в странах азиатско-тихоокеанского региона, таких как Индия,

Китай, Тайвань, Вьетнам и др. Вышли в лидеры по производству композитов такие страны как Китай и Индия. Объем продаж композитов из этих стран только за 2013-2014 годы составил более \$70 млрд., прогноз до 2023 года предусматривает рост на 4,6% ежегодно [1]. Сдерживающими факторами остаются проблема утилизации и ограниченная ремонтопригодность. Российский рынок производства композитов характеризуется преобладающей долей стекловолокна, она составляет около 130 тыс. тонн в год, причем 80% этого объема это импорт. Например, в отечественных судах доля ПКМ составляет 0,1% тогда как в мире этот показатель равен 68%.

Целью данной работы является выявление механизмов взаимодействия между режущим инструментом и материалами подвергающимся обработке. А так же изучение основных проблем механической обработки и пути их решения при изготовлении узлов реверса перспективного двигателя ПД-14.

При изготовлении двигателя ПД-14 используются материалы препрег из углепластика ВКУ-29 ТУ 1-595-11-1352-2012, ВКУ-39 ТУ 1-595-11-1352-2012 и препрег из стеклопластика ВПС-48/7781 ТУ 1-595-10-1380-2013. Применение этих материалов обусловлено тем, что стеклопластиковые и углепластиковые ПКМ образованы комбинацией волокон (стеклянных или углеродных) и полимерной матрицы. Волокна легкие, жесткие и прочные, они обеспечивают наибольшую жесткость и прочность. Полимерная матрица связывает волокна вместе, таким образом, перераспределяет нагрузки армированных волокон, и обеспечивает защиту волокон от воздействия внешней среды. Примеры применяемых конструктивных решений представлены на рисунке 1.

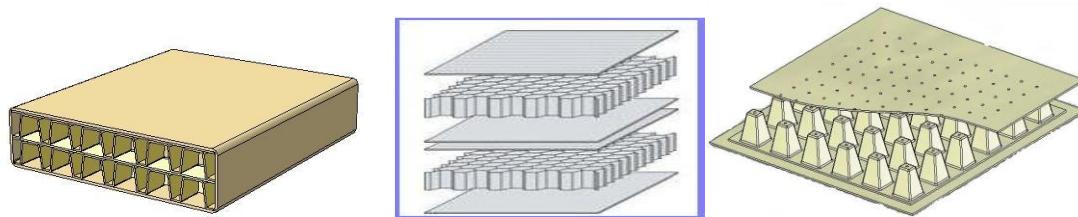


Рис. 1. Примеры конструкции композиционных материалов на основе стекловолокнитов и углерод-углеродных материалов.

Известно, что композиционный материал представляет собой комбинацию из разнородных и нерастворимых друг в друге компонентов, соединяемых между собой в единое целое за счет адгезионного взаимодействия на границе их раздела. В зависимости от типа матрицы все многообразие композитов можно разделить на четыре группы полимерные (ПКМ), металлические (МКМ), керамические (ККМ) и углерод-углеродные (УУКМ). Наиболее прочными и хорошо освоенными являются композиционные материалы, армированные непрерывными стеклянными, арамидными, углеродными, борными и металлическими волокнами (рис.2) [2].

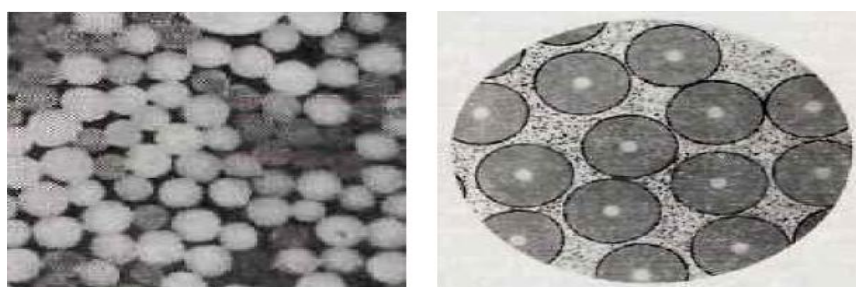


Рис. 2 Примеры структур стеклопластика

Особенности структуры и свойств, а также специфика композиционных материалов, как объекта обработки резанием выделяет их в особую группу труднообрабатываемых материалов, которая характеризуется своими закономерностями протекания процесса резания [3]. Сегодня становится ясно, что невозможно напрямую эффективно использовать традиционные рекомендации и методы, изученные еще профессором Тиме И. А., применяемые при обработке резанием труднообрабатываемых сталей и сплавов [2].

При механической обработке (сверлении, обрезке, перфорации, точении и фрезеровании) деталей из углепластика и стеклопластика возникают дефекты, такие как отслоение и вырыв волокна. Из-за данных дефектов резко сокращаются силы, противодействующие усталостным напряжениям, что в целом снижает ресурс конструкции и увеличивает вероятность появления отказа оборудования. Среди дефектов, полученных в

результате сверления, отслоение является основным. Как указывают Wong T.L. и др. [4], а так же Stone R. и др. [5] в авиационной промышленности, отказ деталей из-за расслоения, состоящих из углепластиков, обусловленных процессами сверления и фрезерования достигают до 60%. Это прежде всего связано с обеспечением качества обработанной поверхности и точности размеров. Основные дефекты поверхности композиционного материала при воздействии режущего инструмента следующие: неравномерная шероховатость; большая волнистость; вырывы и сколы на торцах; расслоение волокна; ворсистость; трещины; царапины; отклонение формы и взаимного расположения поверхностей. Примеры возникающих дефектов при точении и сверлении представлены на рис. 3.

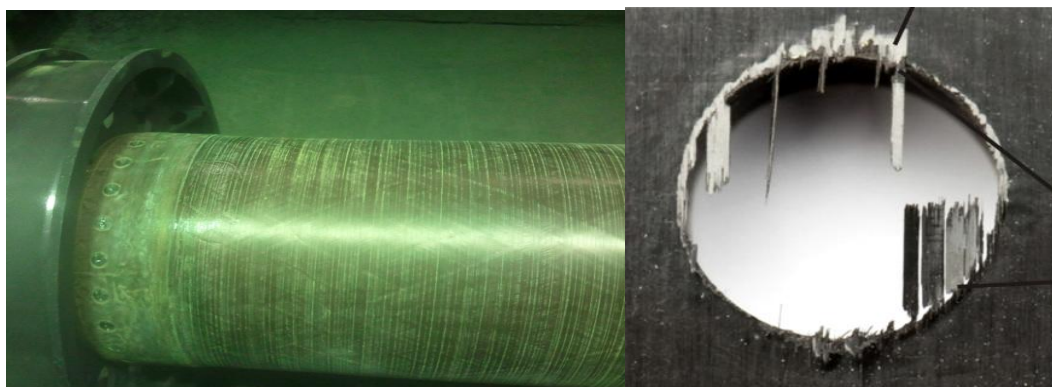


Рис.3. Примеры дефектов, полученных при обработке изделий из ПКМ.

Сравнивая обработку ПКМ с стружкообразованием при резании металлов, можно и необходимо отметить, что во многом он несет в себе признаки образования элементной стружки и одновременно стружки надлома. Вместе с тем отдельные элементы и частицы удаляемого материала, как правило, остаются связанными между собой обрывками волокон наполнителя, т. е. стружка сходит в виде непрерывной ленты. Формированию стружки сопутствует образование мелких частиц материала и пыли являющейся высокотоксичной и губительной для узлов станка. По мере увеличения ширины площадки износа по задней поверхности инструмента связь между отдельными элементами стружки становится менее прочной.

При достижении определенной степени износа стружка начинает распадаться на отдельные мелкие кусочки разной величины. Такой тип стружки характерен для точения, сверления и фрезерования деталей из ПКМ.

Анализ процесса деформации композиционного материала показывает, что в отличие от металла у композиционных материалов наблюдается следующее:

1. Анизотропия свойств материалов, вследствие чего деформации не передаются через слоистую структуру и связующую смолу, а происходит разрушение структуры материала в виде продольных трещин и отделения мелких частиц пыли на передней поверхности инструмента вместо стружки. В простейшем варианте, когда полимер армирован однонаправленными непрерывными волокнами и подвергается растяжению в направлении их ориентации, деформация компонентов одинакова и возникающие в них напряжения пропорциональны модулю упругости волокон матрицы.

2. Высокая твердость и прочностные характеристики стекловолокна и углеволокна используемого в композиционных материалах препятствуют нормальному процессу резания, вызывают рост силы сопротивления резанию;

3. Высокая твердость наполнителя и его абразивное воздействие на режущий инструмент вызывают его повышенный износ.

4. Низкая теплопроводность композитов, которая существенно влияет на соотношение составляющих теплового баланса при резании в отличие от резания металла. При повышенных температурах, сопровождающих обработку резанием, вызывает нарушение устойчивости и разрушение химических связей молекулярных цепей полимера, появление прижогов с образованием коксового слоя, выделением газообразных продуктов распада связующего и сопровождается при этом потемнением поверхности материала. Для ответственных узлов изделий ракетно-космической техники и др. это является недопустимым дефектом [6];

5. Высокие упругие свойства композиционных материалов, что вызывает повышенный износ инструмента по задней поверхности из-за интенсивных контактных явлений [7].

Для исследования процессов повышения эффективности лезвийной обработки использовали предложенную Ярославцевым В.М. [8] модель систематизации улучшения процессов резания. Нами были проведены совместно с кафедрой «ИТМ» ПНИПУ исследования проблем обработки ПКМ, были выбраны для исследования два направления: лезвийная обработка ПКМ [9], [10]; процесс обработки ПКМ на гидроабразивной и лазерной установке.

Предварительно были вырезаны заготовки образцов из препергов ВКУ-29, ВКУ-39 и ВПС-33 при помощи шлифовальной машинки размерами 100*100 мм. и толщиной 3 мм. Тестовая резка образцов производилась на установке лазерной резки с охлаждения зоны резания азотом. Аналогично производилась резка образцов на установке гидроабразивной резки. Необходимо отметить то, что при резке на установке гидроабразивной резки использовалось меньшее давление подачи воды, чем при резке металла, а так же был произведен слив воды из ванны. Были использованы добавки (присадки), оказывающие водоотталкивающее действие на детали.

При изучении полученных образцов было выявлено следующее:

При гидроабразивной резке

- полностью отсутствуют сколы, вырывы армирующего волокна и трещины на торцах, которые появляются при лезвийной обработке;

- почти полностью исчезло выделение токсичных веществ сопутствующих процесс лезвийной обработки на станках токарной и фрезерной группы;

- отсутствует износ режущего инструмента, происходит только равномерное использование расходных материалов;

- отсутствуют оплавленные участки и подтеки связующего, обусловлено это в первую очередь низкой температурой в зоне резания;

-шероховатость обработанной поверхности соответствует установленным требованиям (заявленных в КД);

-возможность обрабатывать ПКМ с металлическими армирующими наполнителями (титан, циркон и т.д.);

-при получении отверстий полностью исчез дефект отслоения и исчезла усадка стенок отверстий (является основным дефектом при сверлении ПКМ);

-повысилась производительность процесса обработки в 1,5 раза, а трудоемкость в нормо-часах снизилась на 40%;

-выявились минусы — это возможность применения только ограниченной номенклатуры деталей по габаритам и форме;

-отсутствует возможность открытия глухих, не сквозных отверстий.

При лазерной резке (с охлаждением азотом).

-так же полностью отсутствуют сколы, вырывы армирующего волокна и трещины на торцах, которые появляются при лезвийной обработке;

-уменьшилось незначительно выделение токсичных веществ сопутствующих процесс лезвийной обработки (выявилось необходимость применение дополнительной вентиляции);

-отсутствует износ режущего инструмента, происходит равномерный износ расходных материалов (газ);

-остаются оплавленные участки с подтеками связующего, обусловлено это высокой температуры в зоне резания (необходимо доработать систему охлаждения зоны резания);

-шероховатость обработанной поверхности соответствует установленным требованиям;

-возможность обрабатывать ПКМ с металлическими армирующими наполнителями;

-при получении отверстий полностью исчез дефект отслоения (является основным при сверлении), но появились дефекты на выходе отверстия в виде наплыва (подтека) связующего;

- повысилась производительность процесса обработки в 1,7 раза, трудоемкость в нормо-часах снизилась на 60%;
- возможность применение только ограниченную номенклатуру деталей по форме и габаритам;
- так же отсутствует возможность открытия глухих отверстий (требуется отдельное изучение).

Полученные данные представлены на диаграмме, рисунок 5.

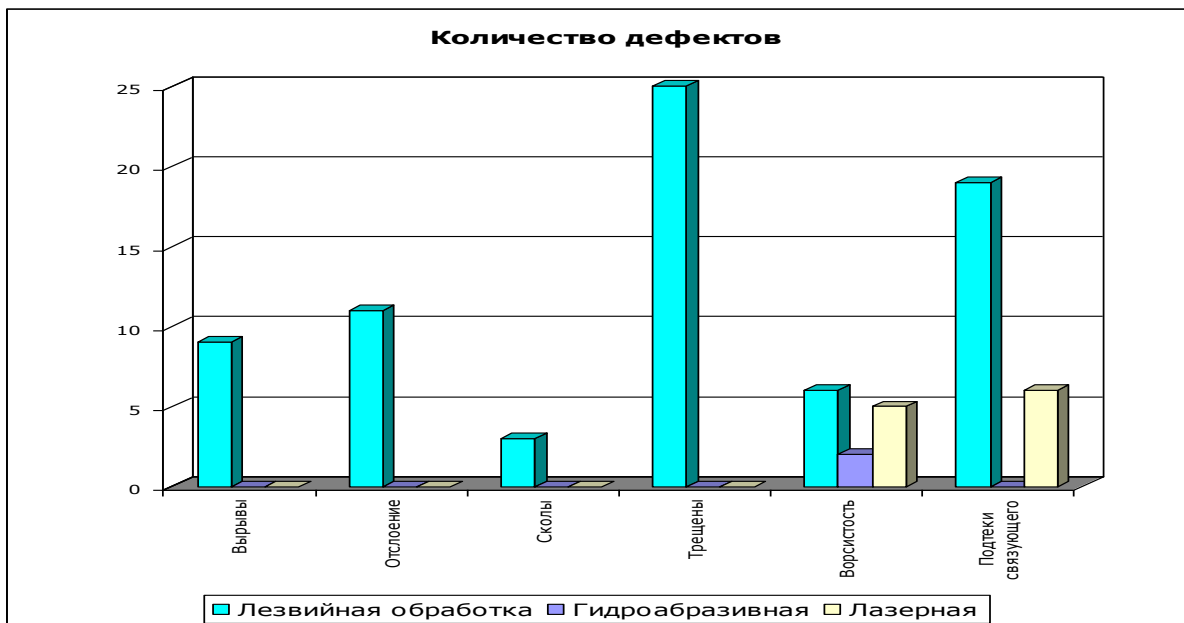


Рис. 5 Диаграмма соотношение количества дефектов к количеству обработанных пятидесяти деталей из препрега ВПС-33.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, о том, что применение установок гидроабразивной и лазерной резки позволяют повысить качество изготовления деталей из ПКМ (как ячеистых, так и слоистых), а так же повысить производительность в среднем в 1,5 раза. При гидроабразивной резке отсутствует термическая деструкция матрицы, возможность резки конструкций большой толщины. Остается опасность насыщения композита водой, требуется изучение гидрофобных присадок. При лазерной резке малая ширина реза, высокая скорость резки, обработка маложестких деталей. Минусы: Термическая деструкция матрицы, выделение токсичного дыма и пыли.

В данной работе рассмотрены и предложены пути и возможности повышения эффективности лезвийной обработки деталей из ПКМ.

Проводя изучение процесса механической обработки ПКМ, было выявлено то, что радиус режущей кромки для обработки деталей из препрега ВПС-33 (0,002...0,003 мм) может применяться в два раза больше, чем при обработке деталей из препрега ВКУ-29 (0,0007...0,001 мм). Влияние размера заднего угла не было выявлено, в среднем он составляет 15 градусов. Скорость резания при обработке деталей из препрега ВПС-33 оптимально составляет 100 м/мин, а для обработки деталей из препрега ВКУ-29 оптимальной является скорость 150...500 м/мин. Величина подачи при обработке деталей из препрега ВПС-33 оптимально составляет 0,05...0,25 мм/об, а для обработки деталей из препрега ВКУ-29 оптимальной является подача 0,01...0,15 мм/об.

При сверлении деталей из ПКМ применяют скорости резания 100...200 м/мин при низких подачах в диапазоне 0,02...0,1 мм/об. А на входе и выходе сверла для устранения расслаивания необходимо снижать величину подачи.

Выводы

Представленные выше методы обработки позволяют решить задачу повышения производительности при изготовлении изделий за счет применения новых конструкций режущего инструмента, подбора оптимальных режимов резания, изучения термодинамических явлений, что в конечном результате приведет к повышению эффективности, повышению качества и снижению себестоимости.

Полученный опыт при обработке изделий из ПКМ показал, что эффективность обработки можно значительно повысить, если при изготовлении ПКМ учитывать не только требуемые свойства получаемой конструкции, но также как полученный ПКМ будет обрабатываться.

Было выявлено то, что основным способом обработки ПКМ остается лезвийная механическая обработка, способы гидроабразивной резки

эффективны, но на всегда подходят (как правило из-за габаритов изделий), а резка на плазменных и лазерных установках не всегда допустима из-за невысокой температуры плавления связующих смол что приводит к выделению токсичных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Durao, L.M.P., Magalhaes, A.G., Marques, A.T., Baptista, A.M., Figueiredo, M. Drilling of Fibre Reinforced Plastic Laminates / Materials, Science Forum. 2008, Vols. 587-588, pp. 706-710.
2. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения: учеб. пособие. – М.: из-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2011г.
3. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты./ М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2009. с. 658.
4. Wong T.L., Wu S.M., Croy G.M. An analysis of delamination in drilling composite materials. In: 14 th National SAMPE technology conference.-Atlanta, GA, USA, 1982.
5. Stone R., Krishnamurthy K. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates/ Int.- J Mach Tools Manuf, 1996.
6. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов/ учеб. пособие. – М.: - издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 4-6.
7. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов/ Научные технологии в машиностроении. 2014. №7. С. 3-5.
8. Ярославцев В.М. Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация/ вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.- 2007. с. 56-70.

9. Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов/ В.Ф. Макаров, А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин/Вестник ПНИПУ, 2015.

10. Исследование современных процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов/ А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин, В.Ф. Макаров//Новые технологии. Том.2.-Материалы XII Всероссийской конференции, посвященной 70-летию победы. – М.:РАН, 2015 – с. 65-73.

Alexander Evgenevich Meshkas, Head of Production and Dispatch Department, JSC "PP" Mashinostroitel "graduate student, a-meshkas@mail.ru, t. 89638777227, 614056, Russia, Perm, ul. Novozvyaginskaya, 57 JSC "PP" Mashinostroitel ".

Vladimir Fedorovich Makarov, Deputy. Head of Department, doctor of technical sciences, professor, academician of RAE, makarovv@pstu.ru, t.89124915014, 614600, Russia, Perm, Komsomol prospectus, 29 PNI PU.

Vitaly Vladimirovich Shirinkin, Head of Quality Management, t. 89091002247, 614056, Russia, Perm, ul. Novozvyaginskaya, 57 JSC "PP" Mashinostroitel".

Abstract: This paper aims to present the main problems encountered when machining (drilling, cutting, during, milling) the details of the modern high-olimernyh composite materials used in aircraft construction and special machinery. In this paper the experimental study of the various methods of processing by milling RMB. Present ways to increase the productivity of the process to cut the RMB

Keywords: processing, polymer composites and rials, quality, drilling, water jet cutting, cutting milling defects problem, anisotropy of the properties a cutting tool, tool life, axial force.

ВЛИЯНИЕ ФУЛЛЕРОИДНЫХ ДИСПЕРСИЙ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Валентин Григорьевич Юрьев, к.т.н., доцент

Тел. (812) 540-58-37, e-mail: yurev_mv@rambler.ru

Владимир Александрович Никитин, к.т.н., доцент

e-mail: nikwww@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Владимир Маркович Петров, д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: tehneh@spbgasu.ru

Аннотация

Рассмотрено влияние фуллероидных дисперсий на шлифуемость антифрикционных углепластиков марок ФУТ и УГЭТ, широко применяемых в качестве материалов для подшипников скольжения. Установлено, что модификация масла И-20А, используемого в качестве СОТС, наномодификатором HFNCM снижает обрабатываемость углепластиков за счет изменения триботехнических характеристик базового масла.

Ключевые слова: углепластик, фуллероидные дисперсии, шлифование, обрабатываемость, скорость снятия материала, эффективная мощность.

Все большее применения в различных отраслях находят фуллерены и их производные [1]. Актуальным направлением является модификация материалов наноразмерными фуллероидными частицами. Так, в работе [2] было установлено, что крайне малые добавки наноразмерных частиц (в количестве $10^{-14} \dots 10^{-15}$ единиц на 1 кг масла) приводят к повышению окислительной стабильности масла вследствие прерывания радикально-цепного механизма его окисления на поверхности наночастиц и резкому загущению масла при сильном механическом воздействии в зоне трения.

Модификация фуллероидными наночастицами может приводить к структуризации дисперсионной среды (в нашем случае масла) подобно

тому, как это происходит в водных средах [3, 4], и качественно изменять свойства СОТС в зоне резания.

Активное воздействие на зону трения с помощью наномодификации возможно благодаря особым физико-химическим свойствам этих наночастиц, таких как высокая термодинамическая устойчивость и сорбционная активность. Фуллероидные наночастицы характеризуются способностью к диссипации всех видов энергии [5], выделяющейся в процессе граничного трения в виде фотонов, фононов и экзоэлектронов [6]. Многочисленный экспериментальный материал, приведенный в [7], дает основание считать, что абсорбция водорода металлом в триботехнических узлах, содержащих органическую смазку или полимер, представляет основную причину износа. Диссипация энергии в виде экзоэлектронов особенно важна для снижения водородного изнашивания.

Модификация алмазных кругов на органической связке углеродными наноматериалами показала, что при «сухом» шлифовании твердого сплава таким инструментом его износ значительно уменьшается по сравнению с серийными кругами [8]. Совместная модификация алмаза и связки дает наиболее высокие показатели коэффициента шлифования, который в 2...2,5 раза превышает серийный инструмент при оптимальной концентрации модификатора.

В настоящей работе рассматривается влияние на процесс шлифования модифицированных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Обрабатывались антифрикционные углепластики марок УГЭТ и ФУТ, широко используемые в качестве материалов для подшипников скольжения. Использовался углеродный наномодификатор HFNCM. Он получен на основе продуктов синтеза фуллеренов плазменно-дуговым методом. Материал состоит из полидисперсных многослойных углеродных наночастиц - продукта комплексной обработки депозитов, образующихся при плазменно-дуговом синтезе фуллеренов [9].

Проведены сравнительные испытания СОТС трех составов: масляная СОТС без добавок; масляная СОТС с антизадирной присадкой С-5А; масляная СОТС с присадкой С-5А и наномодификатором HFNCM. В качестве базового масла СОТС использовали индустриальное масло И-20А (ГОСТ 20799-88). Целью введение присадки С-5А являлось повышение седиментационно-агрегативной устойчивости наномодификатора. В отдельных экспериментах установлена рациональная концентрация присадки С-5А, равная 5 %.

Для изучения влияния наноуглеродного фуллероидного материала HFNCM на обрабатываемость углепластиков готовили СОТС на базе индустриального масла марки И-20А, содержащего 5% полимерной присадки С-5А и с концентрациями HFNCM от 10^{-4} до 10^{-2} мас. %.

Для оценки обрабатываемости использовался стенд, созданный на базе заточного станка мод. 3М642 [10]. Стенд оснащен специальными устройствами. Шлифование выполнялось со скоростью $V = 14,6$ м/с с регламентированным усилием прижима P_y образцов из углепластиков УГЭТ и ФУТ сечением 10х15 мм к шлифовальному кругу 1А1 125х16х32х5 АС6 125/100 В24 100. В экспериментах усилие прижима $P_y = 30$ Н постоянно контролировалось и поддерживалось. Для этой цели использовалось специальное устройство [10]. СОТС в зону взаимодействия образца и инструмента подавалась с расходом 100 ± 10 капель/мин. Продолжительность непрерывного шлифования составляла 4...16 мин.

Для оценки обрабатываемости использовались следующие параметры:

- скорость сошлифовывания слоя материала образца Z' , мм/мин. Скорость снятия регистрировалась, не прерывая процесса шлифования;
- эффективная мощность, приведённая к 1 мм ширины образца, N^* , Вт/мм. Мощность измерялась прибором Metrix-120 и регистрировалась;
- затраты работы на сошлифовывание 1 мм³ материала Э, Дж/мм³. Затраты энергии рассчитывались по экспериментально полученным значениям мощности и скорости удаления материала при шлифовании;

- параметр шероховатости ***Ra***, мкм.

Отдельные результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Влияние концентрации наномодификатора HFNCM на параметры процесса шлифования углепластика ФУТ

СОТС	Скорость снятия материала образца Z' , мм/мин	Приведенная мощность N^* , Н/мм	Расход энергии на шлифование $\mathcal{E}$, Дж/мм ³
И20А + С-5А	$1,28 \pm 0,05^{**}$	$5,03 \pm 0,03^{**}$	23,7
И20А + С-5А + 10^{-4} мас. HFNCM	$0,79 \pm 0,05$	$4,86 \pm 0,04$	37,0
И20А + С-5А	$0,77 \pm 0,06$	$4,62 \pm 0,02$	35,9
И20А + С-5А + 10^{-3} мас. HFNCM	$0,45 \pm 0,05$	$4,51 \pm 0,04$	60,4
И20А + С-5А	$1,31 \pm 0,04$	$4,50 \pm 0,02$	20,7
И20А + С-5А + 10^{-2} мас. HFNCM	$1,00 \pm 0,03$	$4,11 \pm 0,03$	24,6

** 95 % доверительный интервал

Таблица 2

Влияние концентрации наномодификатора HFNCM на параметры процесса шлифования углепластика УГЭТ

СОТС	Скорость снятия материала образца Z' , мм/мин	Приведенная мощность N^* , Н/мм	Расход энергии на снятие материала $\mathcal{E}$, Дж/мм ³
И20А + С-5А	$0,28 \pm 0,02^{**}$	$3,65 \pm 0,03^{**}$	77,7
И20А + С-5А + 10^{-4} мас. HFNCM	$0,20 \pm 0,01$	$3,42 \pm 0,01$	103,6
И20А + С-5А	$0,49 \pm 0,02$	$3,85 \pm 0,02$	47,6
И20А + С-5А + 10^{-3} мас. HFNCM	$0,34 \pm 0,03$	$3,56 \pm 0,03$	63,3
И20А + С-5А	$0,33 \pm 0,02$	$3,82 \pm 0,02$	70,0
И20А + С-5А + 10^{-2} мас. HFNCM	$0,27 \pm 0,02$	$3,71 \pm 0,01$	83,2

** 95 % доверительный интервал

Из табл. 1 и 2 можно видеть, что физико-механические свойства исследованных углепластиков колеблются в широких пределах. Так, при использовании разных образцов (см. данные для И20А + С-5А) отличия скорости удаления материала и расхода энергии на сошлифовывание материала достигает более двукратного значения, а эффективная

мощность изменяется до 20 %. Для наиболее объективной оценки влияния концентрации наномодификатора HFNCM на обрабатываемость углепластиков использовались относительные оценки. В таких условиях максимальная точность сравнения обрабатываемости обеспечивалась при выполнении двух экспериментов – с модификатором COTC и без него – последовательно или при чередовании таких экспериментов на одном и том же образце. Это снижает погрешности, связанные с колебаниями параметров инструмента и условий проведения экспериментов.

При постоянной величине P_y влияние фуллеренов при шлифовании отражается на снижении эффективной мощности N^* на 2...9 %, что прямым образом связано с уменьшением составляющей силы резания P_z . Меньшие величины P_z не столько связаны со снижением сил трения в зоне контакта, сколько с торможением процессов разрушения, сопровождающих резание. В преобразованных модификатором условиях шлифования характер процесса резания имеет особенности, напоминающие работу затупленных режущих кромок (с площадками износа), когда проскальзывание, упругие и пластические деформации преобладают над процессом резания, что, как правило, сопровождается меньшими силами P_z . Похожий результат наблюдается и при упрочнении обрабатываемого материала. Снижение режущей способности инструмента резко понижает скорость снятия материала (для ФУТ на 23...42 %, для УГЭТ на 18...29 %). По этой причине расход энергии на процесс сошлифовывания 1 мм³ углепластика при использовании в составе COTC наномодификатора HFNCM существенно более высокий. Затраты энергии превышают результаты, полученные при шлифовании без модификатора, на 19...56 % для ФУТ и 19...31 % для УГЭТ. Более значимое воздействие модификатора на обрабатываемость наблюдалось для углепластика ФУТ по сравнению с УГЭТ. Кроме того, скорость сошлифовывания образцов из УГЭТ существенно меньше образцов типа ФУТ, что находит логическое объяснение в их различных эксплуатационных характеристиках. УГЭТ (углепластик эпоксидный

триботехнический) применяется при высоких скоростях и малых нагрузках и ФУТ (фенольный углепластик триботехнический) применяется в областях высоких нагрузок и малых скоростей.

Следует обратить внимание на активное влияние на результаты шлифования даже небольших концентраций (10^{-4} мас. HFNCM), что подтверждает данные работы [2]. Менее весомо оказалось использование более высоких концентраций (10^{-2} мас. HFNCM).

Измерения параметра шероховатости **Ra** обработанных поверхностей не выявило статистически значимой разницы между результатами шлифования углепластиков с использованием модифицированной СОТС и без модификации.

Представляется, что механизм действия модификации масла И20А аналогичен модели предложенной в [11]. В соответствии с которой фуллероидные наночастицы, благодаря высокой сорбционной активности, формируют вокруг себя сольватные оболочки из полимерных молекул присадки, способной активно воздействовать на зону контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом при обработке. Одновременно происходит формирование объемной перкаляционной фрактальной сетки. Такая структуризация СОТС обеспечивает более длительное пребывание полимера в зоне трения при повышении температуры, предотвращая десорбцию его с взаимодействующих поверхностей. Таким образом, усиление антифрикционного эффекта происходит за счет суммарного действия объемной фрактальной сетки из наноуглеродного фуллероидного материала HFNCM, способной сдерживать десорбцию полимера и диссипировать тепловую энергию из локальной зоны контакта. Формирование такой сетки возможно при определенных условиях и концентрациях HFNCM, в нашем случае близких к $10^{-3} \dots 10^{-4}$ мас. %.

В целом выполненные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что модификация масляной СОТС наноуглеродным

фуллероидным материалом HFNCM оказывает активное действие на базовое масло. В результате чего в условиях жесткого трибоконтакта при шлифовании происходит изменение его триботехнических характеристик. Об этом свидетельствует снижение обрабатываемости углепластиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров Л.Н., Юровская М.А. Фуллерены. - М.: Экзамен, 2005. - 688 с.
2. Основы прикладной нанотехнологии // А. А. Абрамян, В. И. Балабанов, В. И. Беклемишев и др. - М.: МАГИСТР-ПРЕСС, 2007. - 197 с.
3. Физико-химические свойства водных дисперсий смешанного наноуглеродного материала фуллероидного типа. Ч. 1 / Д. Г. Летенко, В. А. Никитин, А. Ю. Меньшикова и др. // Вестник гражданских инженеров. - 2010. - № 2 (23). - С. 131...138.
4. Физико-химические свойства водных дисперсий смешанного наноуглеродного материала фуллероидного типа. Ч. 2 / Д. Г. Летенко, А. С. Иванов, М. Ю. Матузенко и др. // Вестник гражданских инженеров. - 2010. - № 3 (24). - С. 117...122.
5. Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены. - М: Университетская книга, Логос, 2006. – 376 с.
6. Евдокимов В. Д., Семов Ю. И. Экзоэлектронная эмиссия при трении. - М.: Наука, 1973. — 180 с.
7. Гаркунов Д. Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов. - М.: Изд-во МСХА, 2004. - 383 с.
8. Кремень З. И., Поповский Д. А., Чухнов В. В., Кидалов С. В., Головкин Е. П. Влияние модификации углеродными наночастицами на работоспособность шлифовальных кругов // Металлообработка, 2010, №5(59). - С. 8...9.

9. Летенко Д. Г., Никитин В. А., Чарыков Н. А., Семенов К. Н. Пухаренко Ю. В. Получение углеродных наноструктур из отходов химических производств // Вестник гражданских инженеров, 2010. №1 (22). – С. 108...118.
10. Юрьев В. Г., Петров В. М., Федосов А. В. Об оценке обрабатываемости материалов шлифованием // Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении (МТЕТ-2014): Труды международной научно-технической конференции. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та. 2014. - С. 244...253.
11. Пухаренко Ю. В., Никитин В. А., Летенко Д. Г. Наноструктурирование воды затворения как способ повышения эффективности пластификаторов бетонных смесей // Строительные материалы: наука, 2006. №8. С.11...13.

V. G. Yuriev, V. A. Nikitin, V. M. Petrov

THE INFLUENCE OF FULLEROID DISPERSIONS ON MACHINABILITY OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS

Abstract

The influence of fulleroid dispersions on sanding antifriction carbon-fiber-reinforced grades FT and PET, widely used as materials for sliding bearings. It is established that the modification of the oil-20A, used in the quality of COTS with nanomodifier HFNCM reduces the machinability of CFRP due to the change of tribological characteristics of the base oil.

Keywords: carbon plastic, fulleroid dispersion, grinding, machining, metal removal rate, effective power.

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Виталий Владимирович Ширинкин, ОАО «Пермский завод «Машиностроитель», начальник отдела управления качеством АО «Пермский завод «Машиностроитель», аспирант кафедры ИТМ ПНИПУ, Россия, г. Пермь, e-mail:v-shirinkin@mail.ru

Владимир Федорович Макаров, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО ПНИПУ, Россия, г. Пермь, e-mail:makarovv@pstu.ru

Александр Евгеньевич Мешкас, начальник производственно-диспетчерского отдела АО «Пермский завод «Машиностроитель», аспирант кафедры ИТМ ПНИПУ, Россия, г. Пермь, e-mail:a-meshkas@mail.ru

Аннотация

В работе представлен анализ применения инструментов математического моделирования для описания процессов обработки композиционных материалов. Авторы описывают варианты применения математического аппарата для исследуемой проблемы. В статье отражены проблемы применения математического моделирования. Авторы отмечают наличие проблем с методиками измерения композиционных ламинатов и как следствие противоречивость данных. В статье предлагаются направления решения указанных проблем.

Ключевые слова: математическое моделирование, сверление, композиционные материалы.

Abstract

The paper presents an analysis of the use of tools of mathematical modeling to describe composite materials processing. The authors describe the applications of mathematical apparatus for the investigated of the problem. The article reflects the problem of the use of mathematical

modeling. The authors note there are problems with the methods of measurement of composite laminates and as a consequence of the contradictory data. The article suggests ways of solving these problems.

Keywords: math modeling, drilling, composite materials.

В последнее время научное сообщество уделяет большое внимание вопросам создания и обработки композиционных материалов. При рассмотрении данных вопросов ученые выделяют целый спектр проблем и путей их решения. [1]

Подробный обзор международных исследований по теме: «сверление композиционных материалов», со ссылками на первоисточники, опубликован в работе [2].

Зависимости, полученные при проведении экспериментов международными исследователями, показаны на рис. 1. На графиках рис. 1 (графики б, в, а1) авторами выявлены разные модели влияния скорости резания на расслоение, значения угла при вершине на расслоение, скорости резания на значение осевой силы, что может свидетельствовать об особенностях композиционных материалов и анизотропии их свойств и подтверждает необходимость дальнейших исследований в данной области.

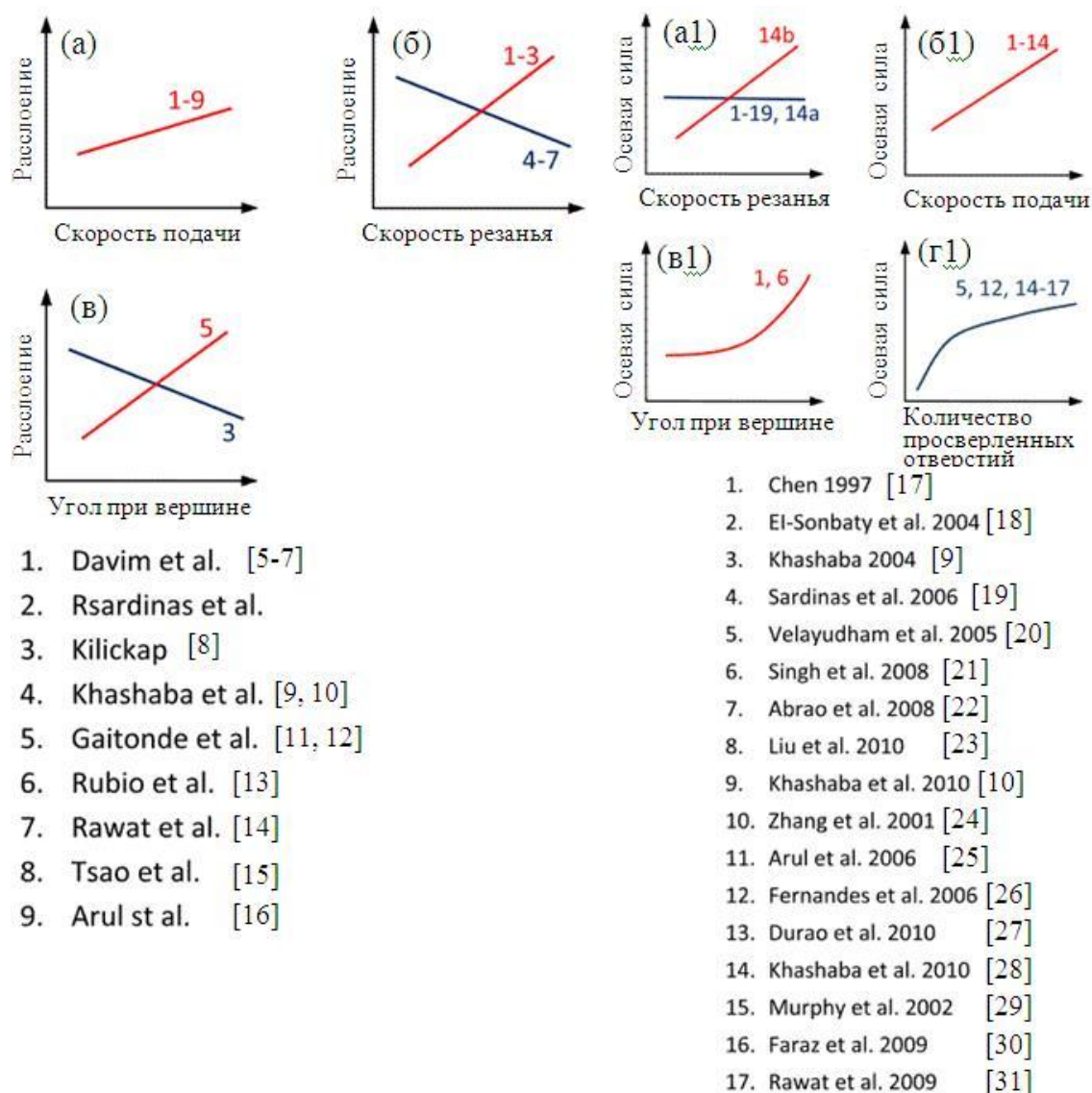


Рисунок 1. Влияние входных переменных процесса резания на расслоение композиционных ламинатов (графики а, б, в). Влияние входных переменных процесса резания на осевую силу при сверлении композиционных ламинатов (графики а1, б1, в1, г1).[2]

Авторы международных публикаций для обработки результатов экспериментов, как правило применяют линейно регрессионный анализ, однофакторный и многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Так например, Davim и др. в своей работе [3] описали эмпирическую модель влияния входных параметров сверления ($V_c=30-50\text{м/мин}$, $f=0.05-0.20\text{мм/об}$), при использовании спирального сверла из твердого сплава, на величину

расслоения углепластикового ламината толщиной 3мм. Данная модель имеет вид

$$F_d = 0,966 + 0,001085V_c + 0,134f$$

Tsao и др. в своей работе [4] описали эмпирическую модель влияния входных параметров сверления ($S=800-1200$ об/мин, $f=0.01-0.03$ мм/об) (при использовании спирального сверла из быстрорежущей стали), на величину расслоения углепластикового ламината толщиной 3мм. Данная модель имеет вид

$$F_d = 1,961 - 10,955f - 0,000181S - 0,0177 d$$

Nocheng и Tsao в своей работе [5] описали модель влияния входных параметров сверления (при использовании спирального сверла), на величину критического осевого усилия. Данная модель имеет вид

$$F_{CT} = \pi \left(\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right)^{1/2},$$

где E -модуль упругости, ν - коэффициент Пуассона, G_{IC} - критическая скорость высвобождения энергии деформации (в момент излома), h -толщина деформированного слоя.

Авторы международных публикаций в своих работах применяют метод конечных элементов и метод конечных разностей для моделирования процесса обработки композиционных материалов. Необходимо отметить, что имеются расхождения в результатах, полученных в ходе экспериментов разными учеными. Это связано с особенностями композиционных материалов, отсутствию стандартизованных методик измерения и влиянию различных факторов при проведении экспериментов.

Учитывая сложности процессов, протекающих в зоне обработки, а также принимая во внимание анизотропность структуры и специальную конфигурацию режущего инструмента, можно утверждать, что наиболее эффективным инструментом для моделирования процесса будет являться комплексное математическое моделирование с применением аппарата математической статистики.

Список литературы:

1. Макаров В.Ф., Ширинкин В.В., Мешкас А.Е. Проблемы механической лезвийной обработки звукопоглощающих конструкций из полимерных композиционных материалов и динамика развития технических решений.// Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №3 (34). ч. I. - С. 128-130
2. Макаров В.Ф., Ширинкин В.В., Мешкас А.Е. Обзор зарубежных публикаций по сверлению композиционных материалов и результаты опытно промышленных испытаний высокоскоростного сверления композиционных ламинатов.// Труды международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2015)» - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. Т.3 – С.390-412
3. Davim JP, Reis P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study. Mater Des 2003;24:315–24.
4. Tsao vCC, Hocheng H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. Int J Mach Tools Manuf 2004;44:1085–90.
5. Hocheng H, Tsao CC. The path towards delamination-free drilling of composite materials. J Mater Process Technol 2005;167:251–64.

V.V. Shirinkin ¹, V.F. Makarov ², A.E. Meshkas ³

^{1, 3} Perm Plant "Mashinostroitel", ²Perm National Research Polytechnic University

*С.А. Чижик, академик НАН Беларуси, М.Л. Хейфец, профессор,
Президиум НАН Беларуси, Минск*

АДДИТИВНЫЕ СИНЕРГОТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА ИЗДЕЛИЙ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

***Аннотация.** Предложен подход, рассматривающий аддитивные методы как синерготехнологии при послойном формировании структур материала на плоской и сложнопрофильной поверхности. Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от источника энергии или подаваемого материала до формируемой поверхности.*

***Ключевые слова:** аддитивные методы, концентрированные потоки энергии, поверхностные явления, синерготехнологии.*

Введение. Сущность аддитивных технологий заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделия по «цифровой модели» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [1, 2].

Современный технологический уклад реализует новую парадигму дизайна, в том числе и молекулярного, «снизу-вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху-вниз» [3, 4]. Передовые технологии, помимо используемых новых аппаратных и программных средств, оборудования и оснащения, основываются на *послойном выращивании поверхностей* изделий и *самоорганизации структур* композиционного материала [5, 6]. Так, определяя фундамент передовых нанотехнологий, Ж.И.Алферов выделяет кроме зондовой микроскопии, *эпитаксиальный рост пленок на поверхности* и процессы *самосборки гетероструктур* материала [7].

Поэтому особенно перспективен подход, рассматривающий аддитивные методы как *синерготехнологии*, обеспечивающие

самоорганизацию поверхностных явлений при послойном формировании структур поверхностных слоев различных материалов и управление их свойствами при разнообразных физических воздействиях [8, 9].

Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от источника энергии или подаваемого материала до формируемой поверхности, а также позволяет в результате взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои [9, 10].

Расстояние до формируемой поверхности особо важный чувствительный фактор при «непосредственном осаждении слоя» по технологиям DD - Direct Deposition, а изменение расстояния важно для стабилизации толщины слоя при «предварительном формировании слоя» материала по технологиям BD - Bed Deposition, подразумевающим наличие некоторой платформы, на которой послойно создается материал и изделие [2, 3]. Выбор в аддитивной технологии источника энергии или подаваемого материала определяет не только технологическую среду процесса (дискретную или непрерывную), но и поверхностные явления, обеспечивающие самоорганизацию в синерготехнологии [10, 11].

Использование концентрированных потоков энергии. Прямое выращивание изделий послойным синтезом материала возможно в различных агрегатных состояниях - твердом, жидком, газообразном и в разнообразных высокоэнергетических процессах [5, 9] с объемной, множеством локализованных и единой сфокусированной зоной поглощения [8, 10] в зависимости от плотности мощности потоков энергии (таблица).

Таблица - Высокотенергетические процессы послойного синтеза изделий

Процессы разделения и формирования слоев	Агрегатное состояние наносимого материала	Зоны поглощения и плотность потоков энергии, Вт/см ²	Толщина разделяемого и формируемого слоя, мм
Индукционный нагрев с припеканием и наплавка погружением	твердое (порошок), жидкое (расплав)	объемная, $10^2 \dots 10^4$	0,3...3,0 [12]
Плазменная резка, напыление и наплавка	твердое (порошок)	объемная, $5 \cdot 10^2 \dots 10^5$	0,1...10 [13]
Электроэрозионная обработка и электромагнитная наплавка	твердое (порошок)	множество локализованных, $10^3 \dots 10^5$	0,05...0,5 [14]
Электроннолучевая резка, оплавление и поверхностное модифицирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, $10^3 \dots 10^6$	1,0...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [15]
Лазерная резка, оплавление и легирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, $5 \cdot 10^3 \dots 10^7$	1,0...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [15]
Ионная имплантация и осаждение	газообразное	множество локализованных, $10^3 \dots 10^5$	0,002...0,2 [14]

В процессе индукционной наплавки погружением детали в расплавленный металл объемная зона поглощения энергии распределена по всей наращиваемой поверхности [12]. Толщина формируемого слоя определяется адгезией между расплавом и поверхностью изделия и описывается скоростью подъема детали, напряжением поверхностного натяжения и коэффициентом внутреннего трения. Максимальная толщина слоя при обтекании расплавом поверхности ограничивается условиями потенциального течения и рассчитывается как толщина пограничного слоя, за пределами которого происходит срыв потока [5].

При резке и послойном нанесении металлических порошков в твердом состоянии в плазменных процессах образуется объемная зона поглощения энергии [13]. Толщина формируемого слоя определяется совместным действием кинетического и термодинамического факторов, описываемых скоростью движения частиц порошка и термодинамическим потенциалом

плазменного потока, а процесс формирования слоя характеризуется соотношением между кинетической и джоулевой энергией потока.

В процессах электроэрозионной обработки поверхности и электромагнитной наплавки порошка образуется множество локализованных зон поглощения энергии. Электромагнитная наплавка позволяет наносить покрытие только до определенной толщины, после чего формируемый слой теряет устойчивость, а на поверхности образуются пики, которые при последующих разрядах превращаются в кратеры [14]. Управлять процессом наплавки позволяют электромагнитные потоки. Так, движения и фиксация частиц ферропорошка задаются индукцией магнитного поля, а интенсивное тепловыделение в местах контакта с формируемой поверхностью и плавление порошка определяются напряженностью электрического поля. В результате роста сопротивления ферропорошковой среды, и электропроводности наносимого покрытия, стабилизируется толщина наносимого слоя [10]. Процесс электромагнитной наплавки определяется электромагнитными и инерционными силами и описывается магнитным взаимодействием частиц и напряженностью электрического поля в рабочей зоне [11].

В процессах электроннолучевой резки, формирования и модифицирования поверхностного слоя целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии, сканируемую по всей формируемой поверхности [8]. При лучевой обработке в результате конвекционной неустойчивости в узком поверхностном слое расплава определенной толщины формируются состоящие из вихрей диссипативные структуры. При достаточно быстром охлаждении в таком состоянии по фронту кристаллизации образуется ячеистая структура. Толщина измененного слоя описывается соотношением свойств металла, его коэффициентами поверхностного натяжения и объемного расширения, плотностью в расплавленном состоянии [15].

При лазерной резке, оплавлении и легировании поверхностного слоя, целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии. В процессе кристаллизации материала в ванне расплава также образуется ячеистая структура [8]. Процесс формирования диссипативных структур в расплаве определяется проявлением термокапиллярных явлений и связан с подъемной силой плавучести и силой диссипации в расплаве [5].

При ионной имплантации и осаждении покрытия из газообразного состояния поток ионов не фокусируясь распределяется по поверхности детали, формируя множество локализованных зон поглощения энергии. Толщина наносимого покрытия определяется в основном толщиной слоя, в котором потенциал, прилагаемый к детали, эффективно воздействует на ионы [10]. Этот слой описывается соотношением величины потенциала электрического поля и плотности ионов плазмы с учетом их заряда и массы. Ионы в результате совместного влияния их потенциальной энергии в электрическом поле и тепловой энергии плазменного потока распределяются по экспоненциальному закону, задавая тем самым толщину осаждаемого покрытия.

Рассмотренные высокоэнергетические процессы дают возможность послойно наносить материалы с особыми свойствами и создавать поверхности изделий геометрически сложной формы. Они позволяют направленно изменять физико-механические свойства материала в зависимости от требований эксплуатации деталей в машине [10].

Формирование сложнопрофильной поверхности изделия. Высокоэнергетические процессы аддитивных технологий рассматриваются с системных позиций, как последовательности преобразований вещества, энергии и энтропии в материальных и информационных подсистемах, направленные на изменение точности и качества поверхностей и физико-механических свойств изделия.

Для анализа путей интенсификации формирования структур и фаз поверхностных слоев деталей в обрабатывающей системе выделяются

нестабильные переменные (температура, давление, сила тока, магнитная индукция и др.), которые подчиняют себе развитие, эволюцию стабильных в данном процессе параметров. Такой подход позволяет рассматривать любую структуру, как самостабилизирующийся энергетической обусловленностью комплекс [10]. При эволюции чередование переходов системы из устойчивого в неустойчивое состояние сопровождается сменой масштабного уровня процесса поглощения энергии и образованием диссипативных структур [11].

Для описания процессов модифицирования поверхностных слоев при воздействиях концентрированными потоками энергии исследуется открытая технологическая система с дополнительными термодинамическими степенями свободы и рассматривается формирование диссипативных структур и фаз, рассеивающих избыток подводимой энергии.

Поверхности раздела структур и градиенты свойств слоев при аддитивных синерготехнологиях, формирующих композиционный материал изделия, определяются технологическими барьерами, которые дают возможность установить граничные условия процессов послойного синтеза [16]. Условия создания слоя в высокоинтенсивных процессах целесообразно связать с особенностями конструирования формируемых оболочек изделия.

Конфигурацию границ позволяет рассмотреть компьютерное поверхностное и твердотельное моделирование, при этом задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводится к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности и специфические условия технологий, связанные с устойчивостью процессов, взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями [5, 9].

При индукционной наплавке погружением происходит затекание внутренних полостей, а заполнение пор зависит от условий смачивания расплава [12]. В процессах плазменного напыления и наплавки происходит скругление кромок. На наиболее выступающих участках при электромагнитной наплавке толщина наносимого слоя снижается [11].

Толщина измененного слоя при электроннолучевом или лазерном оплавлении вследствие концентрационного расслоения расплава в образующихся вихрях неоднородна и зависит от степени присутствия легирующих элементов [15]. При ионном осаждении покрытий, на выступах с малым радиусом при вершине вследствие увеличения потенциала слой наращивается наиболее интенсивно [10].

В результате условия создания слоя в высокоэнергетических процессах целесообразно связать с особенностями конструирования формируемых изделий. Для создания слоев стабилизированной толщины в физических полях следует обеспечивать устойчивость технологической системы при индукционной, плазменной, электромагнитной, электроннолучевой, лазерной наплавке и обработке поверхности.

Заключение. Таким образом, аддитивные процессы прямого выращивания изделий послойным синтезом в соответствии с особенностями конструирования формируемых оболочек раскрывают новые перспективы в ресурсном проектировании деталей машин. Использование самоорганизации поверхностных явлений позволяет формировать слои определенной толщины по всей сложнопрофильной рабочей поверхности и управлять обеспечением свойств материала потоками энергии. Наиболее перспективными направлениями развития аддитивных технологий послойного синтеза изделий с управляемым формированием свойств материала являются: создание новых функциональных, градиентных материалов, как для каркаса – основы, так и для поверхностных слоев – покрытий; проектирование процессов, синтезирующих многослойные, композиционные материалы при послойном формировании изделий потоками энергии или вещества; конструирование установок, использующих концентрированные источники энергии или конструкционных материалов для реализации новых процессов послойного синтеза в автоматическом режиме.

Список использованных источников

- 1 Чижик, С.А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С.А.Чижик, М.Л.Хейфец, С.А.Филатов // Механика машин, механизмов и материалов, 2014, №4(29). - С.68-74.
- 2 Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А.Зленко, А.А.Попович, И.Н. Мутылина.– СПб: Изд. СПбГУ, 2013. – 221с.
- 3 Логачева, А.И. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) / А.И.Логачева, Ж.А.Сентюрина, И.А.Логачев // Перспективные материалы, 2015, №5. - С.5-15.
- 4 Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / Под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева / П.А.Витязь, А.Ф.Ильющенко, М.Л. Хейфец, С.А.Чижик и др.– Минск: Беларуская навука, 2011.- 283 с.
- 5 Хейфец, М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей / М.Л. Хейфец.- Новополоцк: ПГУ, 2001.- 156 с.
- 6 Русецкий, А.М. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / Под общ. ред. А.М.Русецкого / А.М.Русецкий, П.А. Витязь, М.Л. Хейфец и др. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 239 с.
- 7 Головин, Ю.И. Введение в нанотехнологию / Ю.И. Головин.– М.: Машиностроение, 2003. – 112 с.
- 8 Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Под ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. - Новополоцк: ПГУ, 2002.- 268 с.
- 9 Хейфец, М. Л. [Моделирование процессов послойного формирования поверхностей с сопутствующей сборкой сложнопрофильных изделий](#) / М.Л.Хейфец, С.В.Кухта, О.П.Голубев, Ж.А.Мрочек //Сборка в машиностроении, приборостроении, 2007, №7. – С. 11-15.
- 10 Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л.Хейфец.– М.: Машиностроение, 2005. – 272с.

11 Гордиенко, А.И. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец, Б.П.Чемисов и др. - Минск: ФТИ; Полоцк: ПГУ, 2000.- 172 с.

12 Ткачев, В.Н. Индукционная наплавка твердых сплавов/ В.Н. Ткачев, Б.М Фиштейн, Н В. Казинцев и др. - М.: Машиностроение, 1970.-184с.

13 Витязь, П.А. Теория и практика газопламенного напыления / П.А.Витязь, В.С.Ивашко, Е.Д.Манойло и др.- Минск: Наука и техника, 1993.-296 с.

14 Хейфец, М.Л. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / М.Л.Хейфец, Л.М.Акулович, Ж.А.Мрочек, Е.З.Зевелева. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 292 с.

15 Эйдельман, Е.Д. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием / Е.Д. Эйдельман //Успехи физических наук. 1995. Т.165, №11.– С.1279-1294.

16 Чижик, С.А. Технологические барьеры при высокоинтенсивных воздействиях в процессах послойного синтеза и обработки материалов / С.А.Чижик, М.Л.Хейфец, С.А.Филатов // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2015, № 3. – С. 107-113.

*П.А. Витязь, академик НАН Беларуси, М.Л. Хейфец, профессор,
Президиум НАН Беларуси, Минск,
В.Т. Сенють, доцент,
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск,
А.Г. Колмаков, профессор, И.Е. Калашиников, профессор,
Л.И. Кобелева, профессор, Ю.С. Алексеева,
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ЛИТЬЕМ ГРАДИЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

***Аннотация.** Сформированы технологические основы управления свойствами при синтезе композиционных наноструктурированных материалов на основе алюминиевых сплавов. Разработаны технологии синтеза конструкционных материалов на основе алюминия методами модифицирования и центробежного. Предложены технологические процессы получения новых конструкционных наноструктурированных материалов на основе алюминия с содержанием модификаторов в пределах 5 мас. %.*

***Ключевые слова:** наноструктурные материалы, синтез, кристаллизация, центробежное литье, алюмоматричный композит*

Введение. Градиентные композиционные материалы (ГКМ) отличаются от традиционных изотропных КМ наличием пространственно неоднородных структур, благодаря которым они приобретают новые свойства и способны выполнять новые функции. Поиск и разработка новых технологических процессов синтеза ГКМ для моделирования их строения, определяемого параметрами нагружения изделия, представляют собой актуальную задачу при проектировании и изготовлении конструкций, работающих в экстремальных условиях [1, 2].

ГКМ изготавливают чаще всего методами порошковой металлургии, спеканием градиентных порошковых смесей или инфильтрацией специально собранных порошковых каркасов переменного состава. Изготовление анизотропных структур центробежным литьем известно давно, однако возможности получения заданного молекулярного дизайна в дисперсно наполненных КМ изучены слабо, а влияние градиента распределения

наполнителя на работоспособность литых ГKM осталось практически неизученным [3 - 5].

Цель работы – апробировать центробежное литье для получения ГKM на базе алюминиевых сплавов армированием керамическими частицами различной природы и состава, а поверхностные слои с повышенной концентрацией армирующей фазы сформировать за счет направленного перемещения дисперсных частиц в жидкой металлической суспензии.

Анализ движения армирующих частиц в центробежном поле. Перемещение дисперсных частиц в поле действия центробежных сил определяется их плотностью. Твердые дисперсные частицы, имеющие плотность большую, чем матричный алюминиевый сплав, перемещаются к наружной стенке формы (изложницы), менее плотные – к оси вращения, на свободную поверхность (во внутреннюю часть отливки).

Центробежная сила, действующая на частицу, описывается уравнением:

$$P_{ц} = \omega^2 r V (\rho_{ч} - \rho_{м})$$

где ω - угловая скорость вращения, сек⁻¹; r - радиус центра сил инерции частицы и радиус центра сил инерции вытесненного объема жидкого металла, в случае, когда тело имеет однородную плотность, см; V – объем дисперсной частицы, см³; $\rho_{ч}$ и $\rho_{м}$ - соответственно плотность частицы и жидкого металла, г/см³.

Из уравнения видно что силы, действующие на частицу, погруженную во вращающийся расплав, возрастают в $\omega^2 r/g$ раз (где g – ускорение свободного падения, см/с²). Видно также, что сила, действующая на частицы при центробежном литье, увеличивается с увеличением плотности частиц, помещенных в расплав.

В табл.1 приведены значения $\rho_{ч} - \rho_{м}$ для алюминиевого сплава АК12 (удельный вес $\rho_{м} = 2,67$ г/см³) и различных частиц, используемых для армирования КМ.

Таблица 1 - Значения $\rho_{\text{ч}}$ - $\rho_{\text{м}}$ для различных армирующих частиц в алюминиевом расплаве

Дисперсные частицы	$\rho_{\text{ч}}$, г/см ³	$(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}})$, г/см ³
SiC	3,2	0,54
Al ₂ O ₃	3,99	1,33
Графит	1,7	-0,96
SiO ₂	2,65	-0,01
B ₄ C	2,5	-0,16
Базальт	2,75	0,09

Из табл.1 следует, что подъемная сила частиц графита, SiO₂, B₄C имеет отрицательный знак, что объясняет их всплывание и перемещение к свободной внутренней поверхности при вращении жидкого расплава. Основная часть армирующих частиц, находящихся во вращающемся расплаве, согласно табл. 1, будет стремиться к перемещению в сторону стенок изложницы. Известно также, что если инородное включение в момент заливки жидкого металла касается стенки формы, то оно прижимается жидким металлом к ней и не всплывает, несмотря на меньшую плотность. Необходимо также учитывать транспортные функции частиц разной плотности. Это в совокупности, создает возможности для синтезирования ГКМ методами литья с различной степенью армирования.

Методика исследований и аппаратура. Технологией центробежного литья были изготовлены образцы градиентных КМ различных составов (табл.2).

Таблица 2 - Составы образцов, изготовленных методом центробежного литья

№№ составов	Композиции
1	AK12-10%Al ₂ O ₃ (средний размер частиц $\varnothing_{\text{ср}} = 40\text{мкм}$)
2	AK12+10%C ($\varnothing_{\text{ср}} = 200\text{-}400\text{мкм}$)
3	AK12+2%Al ₂ O ₃ +3%C
4	AK12+10%Al ₂ O ₃ +2%C
5	AK12+10%B ₄ C ($\varnothing \leq 60\text{мкм}$)
6	AK12 + 5% базальта (короткие волокна $\varnothing_{\text{ср}} = 12\text{ мкм}$, длина $\leq 3\text{ мм}$)

Образцы ГKM имели форму втулок с наружным диаметром 90 мм, внутренним диаметром 60 мм, высотой 60 мм. Цилиндры разрезали на сектора по образующей и анализировали их боковую поверхность с наружной и внутренней сторон.

Режим центробежного литья был одинаков для всех образцов: температура нагрева оснастки $T = 210 \pm 10^\circ\text{C}$, расплава $T = 750 \pm 10^\circ\text{C}$, скорость вращения $n = 1200$ об/мин, длительность обработки 3 мин.

Изучались структуры и распределение частиц в градиентных слоях на трех уровнях по высоте отливок. Исследования проводили на микроскопе Leica. Измерения твердости образцов производились при помощи твердомера ультразвукового MET – У1 (ТУ 4271-001-18606393-00).

Результаты и обсуждение. Структура градиентных композиционных материалов показана на рисунке. Выявлено, что ширина градиентных слоев и распределение частиц в них меняются с изменением удельного веса частиц, а так же по высоте втулок.

В образце состава 1 в верхней части втулки содержание частиц Al_2O_3 заметно меньше, чем в центральной и нижней части образца.

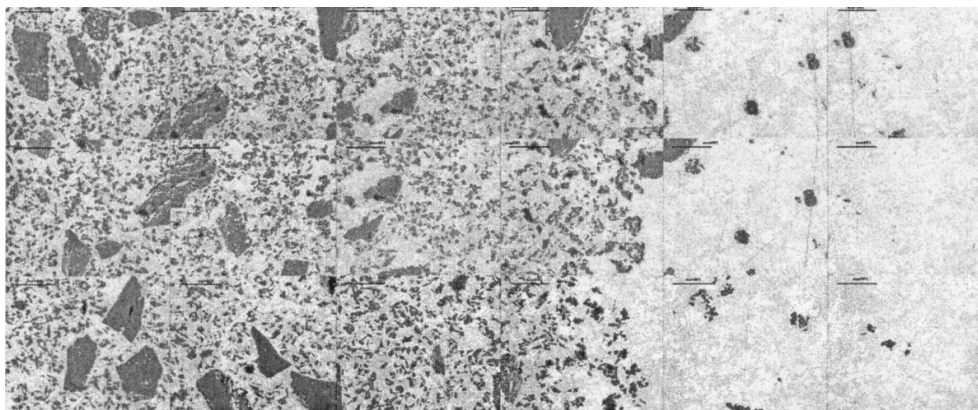
В образце состава 2 градиентный слой не обнаружен. В верхней части втулки наблюдается возрастание объемной доли графита, а в нижней части ее снижение. Это можно объяснить, во-первых, величиной и объемным содержанием частиц, а также тем, что плотность частиц графита меньше, чем алюминия, что влечет за собой снижение центробежной силы.

Для полиармированных образцов состава 3 и 4, градиентный слой формируется более заметно в образце состава 4, содержание частиц Al_2O_3 в котором в 5 раз больше. Распределение частиц по высоте примерно одинаково, всплыванию графита препятствуют частицы Al_2O_3 .

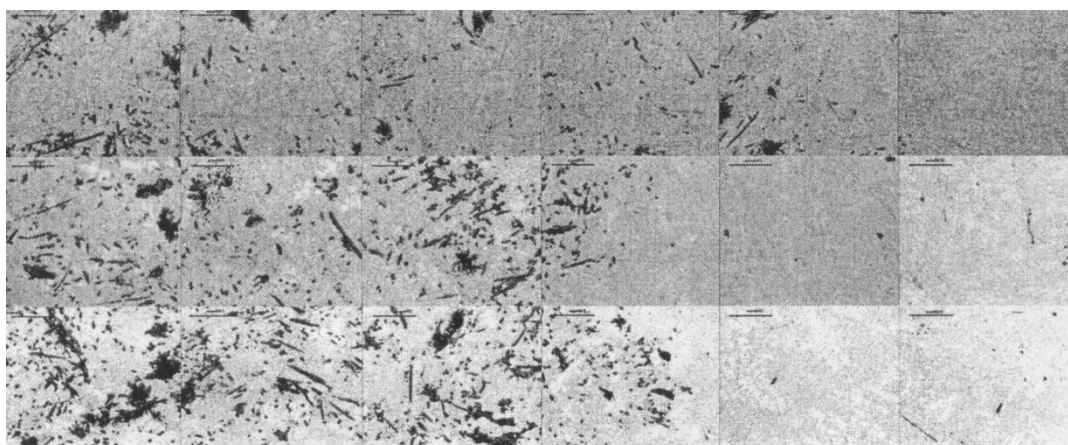
В образце состава 5, армированном частицами B_4C , градиентный слой обнаружен и у внутренней стенки втулки, что естественно, так как значение $\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}}$ для этих частиц (табл. 1) отрицательно, а также, вероятно, в

результате завершения кристаллизации композиционного расплава после прекращения вращения формы.

В образце состава 6, армированном базальтом, градиентный слой ярко выражен в верхней и средней части втулки, в нижней же ее части градиентный слой практически не наблюдается.



а)



б)

Рисунок. Панорамный вид микроструктуры образцов (x 500)

а) АК12 + 10%Al₂O₃ + 2%C; б) АК12 + 5% базальта

В результате исследований установлено, что введение относительно мягких графитовых частиц в матрицу АК12 (образец состава 2) не повышает твердости КМ по сравнению с исходной матрицей.

Введение базальтовых волокон (образец состава 6) повышает твердость в поверхностном слое от 362 у.е. до 433 у.е.

Наиболее высокую твердость в поверхностных слоях имеют образцы (составы 1, 3 и 4), армированные частицами Al₂O₃ (430 – 464 у.е.).

Заключение.

1. Показана возможность и перспективность получения градиентного слоя у дисперсно армированных алюмоматричных композиционных материалов методом центробежного литья.

2. Выявлена, выполняемая легирующими частицами, транспортная функция при изготовлении КМ методом центробежного литья, заключающаяся в том, что частицы с большей плотностью (Al_2O_3) увлекают за собой к внешней стенке изложницы менее плотные частицы (графита).

3. Установлено, что методом центробежного литья можно изготавливать градиентные КМ с твердым поверхностным слоем, обладающим повышенной износостойкостью.

Исследования поддержаны белорусско-российским грантом БРФФИ-РФФИ по проекту T14P-198.

Литература

1. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / Под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева.– Минск: Бел. навука, 2011.- 283с.

2. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. - М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

3. Гусев С.С., Лобков Д.Н., Казачков С.С.. Использование методов центробежного литья для получения изделий из композиционных материалов с упрочненной поверхностью // Материаловедение, 1999, №5, С. 50.

4. Kevorkijan V. Functionally graded aluminum–matrix composites // American ceramic Society Bulletin, 2003, V. 82, Is. 2, P. 60.

5. Анисимов О.В., Штанкин Ю.В. Создание металлокомпозитов на основе алюминия путем кристаллизации жидкого металла в поле центрифуг // Перспективные материалы, 2010, № 2, С. 5.

Мониторинг состояния токарного инструмента на базе фазохронометрического подхода

Антони Борисович Сырицкий, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Российская Федерация, г. Москва, syritsky@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования корреляции износа режущего инструмента и результатов измерений фазохронометрической системы. Приводится краткое описание фазохронометрического метода, основные компоненты и принцип действия фазохронометрической системы. В работе описывается экспериментальное получение измерительной информации, ее математическая обработка и данные, подтверждающие возможность изучения процесса резания фазохронометрическим методом, а также полученные экспериментальные результаты, коррелированные с износом токарного инструмента при обработке резанием в выбранных условиях обработки.

Ключевые слова: фазохронометрический метод, мониторинг, износ инструмента, токарная обработка.

В настоящее время в свете всеобщей информатизации металлообработки актуальной задачей является поиск новых методов мониторинга инструмента, лишенных принципиальных недостатков, сдерживающих их внедрение в промышленность. По мнению авторов данной статьи в качестве подобного метода может выступить фазохронометрический метод (ФХМ) получения информации о работе циклических машин и механизмов. Данный подход был разработан на кафедре «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана, был внедрен и хорошо зарекомендовал себя, например, на таких сложных технических объектах как турбо-, гидроагрегаты, часовые механизмы [1]. Метод характеризуется невысокой стоимостью первичных преобразователей и высокой точностью измерений интервалов времени. Последнее обуславливается тем, что на сегодняшний день наивысшая точность обеспечивается именно в области измерения времени и частоты. Метод подробно описан в трудах профессора М.И. Киселева.

В основе подхода, описываемого в данной работе лежит предположение о том, что при измерении интервалов времени фаз оборота

шпинделя станка при обработке мы получаем информацию о работе машины. В хронограмме вращения, являющейся графическим отражением временного ряда измеренных значений интервалов времени, содержится информация о работе всех узлов станка, в том числе и состоянии инструмента.

Виртуальное разбиение одного оборота шпинделя станка на фазы осуществляется с помощью кругового раstra углового датчика (угловой энкодер). В нашем случае выбран датчик ЛИР-158, выбор которого обусловлен его относительно низкой ценой, достаточной надежностью и точностью. Вал первичного преобразователя соединяется со шпинделем станка через специальное переходник исключающий проскальзывание и тем самым обеспечивающий синхронное вращение вала датчика и шпинделя станка. Корпус датчика при помощи оснастки крепится к корпусу станка [2].

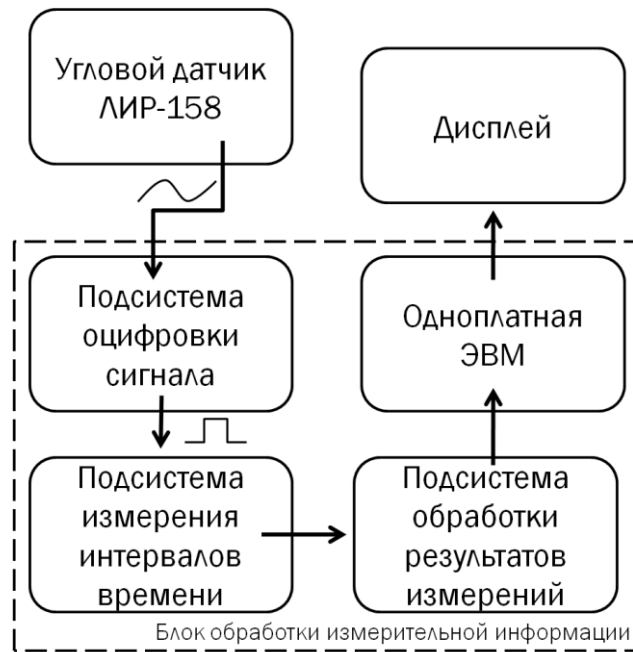


Рисунок 1 - Принципиальная схема измерительного канала

Аналоговый синусоидальный сигнал с датчика поступает на вход блока обработки измерительной информации (рисунок 1). Период сигнала для данного типа датчика не является величиной постоянной и коррелирован с неравномерностью вращения шпинделя станка. При помощи аналоговых компараторов сигнал оцифровывается, после чего производится измерение длительности каждого импульса, для чего в подсистеме измерения

интервалов времени предусмотрен кварцевый генератор с частотой колебаний 50 МГц. Подсистема обработки результатов измерений и одноплатный компьютер обеспечивают формирование и запись полученных временных рядов и их обработку в виде построения хронограммы вращения (графика изменения времени прохождения фазы в зависимости от номера измерения) или частотного спектра этой функции. Скомпонованная подобным образом измерительная система характеризуется относительной погрешностью не хуже $2 \cdot 10^{-2} \%$.

Главной задачей при обработке результатов измерений интервалов времени является выделение информации о режущем инструменте. Для этого требуется отыскание параметра, изменяющегося во времени вместе с износом. Таким параметром было выбрано изменение относительной доли высокочастотных колебаний в спектре хронограммы вращения (рисунок 2).

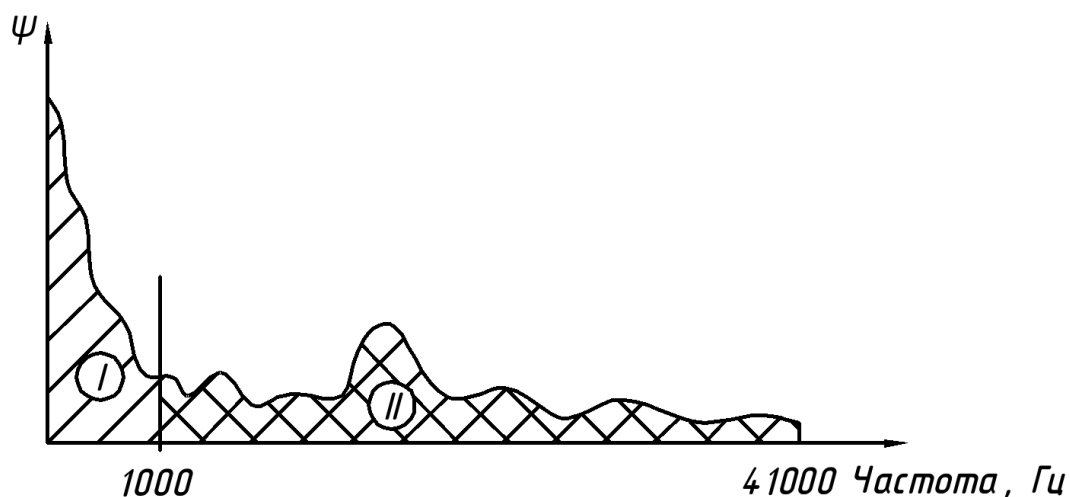


Рисунок 2 - Принцип оценки соотношения мощности

К. Г. Потаповым в [3] было доказано, что в колебаниях до 1000 Гц для такого типа станков содержится информация о неравномерности работы электродвигателя станка, дефектах зубчатого зацепления, смазки. Известно, что колебания, связанные с износом токарного инструмента, являются высокочастотными. Поэтому, поделив мощность спектра из области высокочастотных колебаний (область II) на общую мощность спектра колебаний (область I+ область II), можно получить некоторое процентное

соотношение Ψ , увеличение которого коррелировано с изнашиванием режущей кромки:

$$\Psi = \frac{II}{I + II} \cdot 100\%$$

где I - общая мощность спектра колебаний, Вт;

II - мощность спектра из области высокочастотных колебаний, Вт.

Экспериментальные исследования были направлены на подтверждение вышеописанной гипотезы. Их проведение заключалось в обработке цилиндрической поверхности заготовки диаметром 70 мм из стали 45 на станке 16K20 и записи хронометрической информации в процессе резания. Глубина резания $t=1$ мм, подача $S=0,2$ мм, частота вращения шпинделя станка $n=1000$ об/мин. Последовательно через равные интервалы времени обработки были построены оценки изменения относительной доли высокочастотных колебаний в спектре хронограммы вращения Ψ . Результаты приведены на рисунке 3:

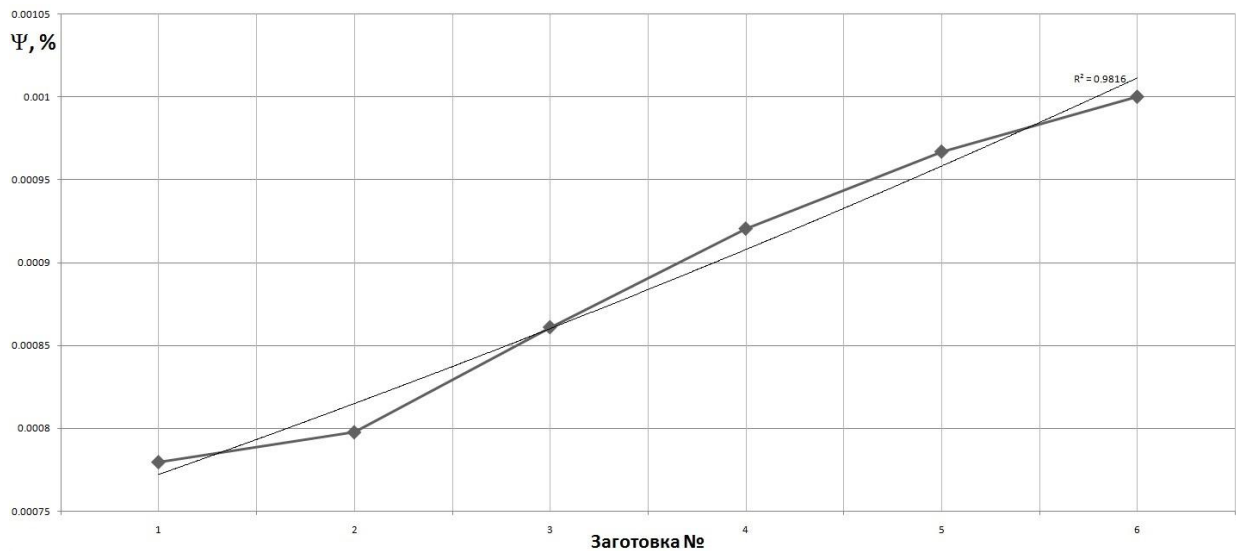


Рисунок 3 - Оценка изменения относительной доли высокочастотных колебаний в спектре хронограммы вращения

Как видно из рисунка 3, трендовая прямая растет с увеличением износа инструмента, поэтому на данный момент этот метод обработки полученной измерительной информации можно выделить как наиболее перспективный.

В результате анализа экспериментальной зависимости, приведенной на рисунке 3, были сделаны выводы о том, что по мере изнашивания режущего инструмента мощность высокочастотных составляющих колебаний вращения шпинделя станка увеличивается относительно мощности низкочастотных составляющих. Это может быть принято за основу при выборе критерия затупления режущего инструмента.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 9.1265.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в сфере научной деятельности (код проекта 1265).

Список литературы

1. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Фазовый метод исследования циклических машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. №9. С.15 – 18.
2. Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // Приборы, №5, 2014. С.13 – 18.
3. Потапов К.Г. Оценка технического состояния главных приводов токарных станков фазохронометрическим методом // Мир измерений, №12, 2014. С. 9.

A.B. Syritsky
Bauman MSTU

Correlation between tool wear and phasechronometric system measurements results are presented. Short describing of phasechronometric method, main components and operating principles of the phasechronometric system are given. Experimental receipt of measuring information, its mathematical processing and data confirming the ability of cutting process study by phasechronometric method as well as experimental results correlated with lathe tool wear during the cutting treatment at chosen processing conditions are described in this article.

Keywords: phasechronometric method, monitoring, tool wear, turning.

Исследование поверхности металла после обработки лазерным излучением

¹ магистр, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: ruzankinajulia@gmail.com

² аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: tesla_90@mail.ru

³ к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: vadim_parfenov@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена исследованию возможности повышения коррозионной стойкости металла за счет лазерного окисления. В работе представлены результаты по изучению поверхности стали 20 после воздействия лазерного излучения. В работе определен химический состав материала. Наблюдалось появление таких химических веществ как О, F, Al. Уменьшилась шероховатость поверхности стали 20 с 0,53 до 0,48. Наилучшие защитные пленки были получены при плотностях мощности в диапазоне от 93,5 Вт/см² до 95,3 Вт/см².

Ключевые слова: металлообработка, лазерное излучение, сталь20, коррозия

Annotations. This work is devoted to study the possibility of improving the corrosion resistance of metal by laser oxidation. The paper presents the results of studies of the surface the steel 20 after exposure to laser radiation. Determined the chemical composition of the material. Was observed the appearance of such chemicals as O, F, Al. Decreased surface roughness of steel 20 from 0.53 to 0.48. The best protective films were obtain at a power density in the range of 93.5 W/cm² to 95.3 W/cm².

Keywords: metalworking, laser radiation, steal20, corrosion

Коррозия металлов –главная проблема всех металлических конструкций и сооружений. Основной ущерб, наносимый коррозией, заключается не в порче металла как такового, а в огромной стоимости изделий, разрушаемых коррозией. Ежегодные потери от коррозии в промышленно развитых странах по оценкам экспертов составляет от 2 % до 4 % валового национального продукта. А потери металла, включающие массу вышедших из строя металлических конструкций, изделий, оборудования,

составляют от 10 % до 20 % годового производства стали [1]. Поэтому, с целью достижения экономического эффекта (уменьшения в разы затрат на ремонт или полную замену оборудования), актуальной задачей является защита конструкций от коррозии.

На протяжении последних десяти лет наблюдается тенденция к созданию новых способов по изменению поверхностных свойств металлов для увеличения коррозионной стойкости. Одним из прорывных методов по защите материалов от коррозии является лазерная обработка. Но несмотря на многолетние исследования по данной тематике остается ряд существенных задач, которые необходимо решить, к примеру, исследовать физико-химические процессы, происходящие на поверхности материала при воздействии лазерного излучения. Целью этой работы является исследование поверхности стали 20 после обработки лазерным излучением.

Авторами статьи были получены результаты, благодаря которым на поверхности стали путем воздействия лазерного излучения были образованы пленки, защищающие от процессов коррозии [2-4]. В настоящее время коллективом проводятся исследования полученных защитных пленок. На рис.1. представлена микрофотография поверхности стали 20 до обработки лазерным пучком и приведен её качественный состав.

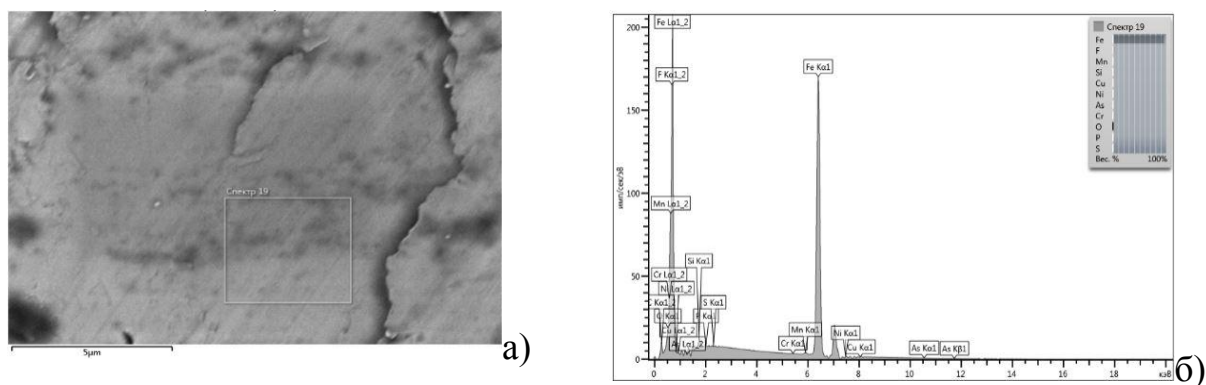
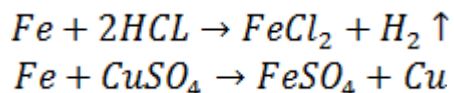


Рисунок 1. Поверхность стали 20 а) до обработки лазерным пучком;
б) качественный состав

Для проведения экспериментов использовался волоконный лазер с длиной волны 1064 нм и мощностью 18,35 Вт. Плотность мощности лазерного излучения варьировалась от 88,4 Вт/см² до 100,6 Вт/см².

Экспериментальные образцы облучали непрерывным лазерным излучением до 35 секунд. Обработка поверхности металла проходила при комнатной температуре 23 °С и относительной влажности воздуха 55%.

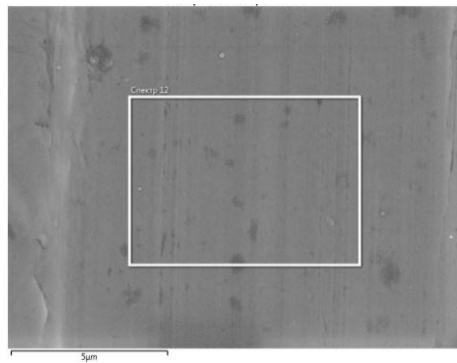
Для определения устойчивости пленок к процессам коррозии, исследуемые образцы помещали в смесь медного купороса и соляной кислоты. Реакция, происходящая на поверхности, описана следующими уравнениями:



На рис.2а. представлена оптическая фотография поверхности стали 20 после взаимодействия с химическим реагентом. Область, обработанная лазерным пучком, почти не поддавалась разрушению, в то время как необработанная поверхность покрылась толстым слоем ржавчины. На рис.2б. микрофотография поверхности после обработки лазерным излучением.



а)



б)

Рисунок 2. Поверхность стали 20 а) после взаимодействия с химическим раствором; б) микрофотография после обработки лазерным излучением

Воздействие лазерного излучения на поверхность стали 20 способствовало небольшому изменению химического состава. Было обнаружено появление таких химических веществ как Al, F, O. Стоит отметить, что присутствие F было изначально в исследуемой марки стали, но воздействие лазерного излучения значительно увеличило его концентрацию в

металле от 0.01 атом. % до 5,24 атом. %. На рис.3. представлены данные с электронного микроскопа.

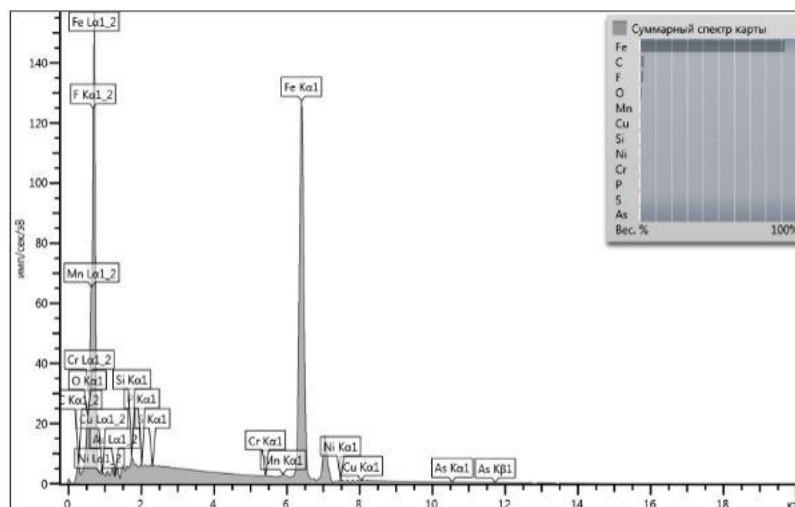


Рисунок 3. Качественный состав поверхности стали 20 после воздействия лазерного излучения

Также в процессе исследования было зафиксировано изменение шероховатости поверхности стали 20 (см. табл.1.).

Таблица 1. Изменение шероховатости поверхности стали 20

	Необработанный материал	Наличие защитного слоя
Ra	0,53	0,48
Rz	3,66	2,66

Полученные в ходе исследования результаты позволяют выделить оптимальные условия обработки поверхности сталь 20. Наилучшие защитные покрытия были получены при плотностях мощности в диапазоне от 93,5 Вт/см² до 95,3 Вт/см². Стоит отметить, что исследования находятся на начальном этапе и будут продолжены для более детального анализа.

Список литературы

- [1] Горнопромышленные ведомости. 2015: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.miningexpo.ru/articles/424> . (Дата обращения: 25.03.16)

- [2] Рузанкина Ю.С., Васильев О.С. Исследование возможности повышения коррозионной стойкости металлов // Наука и инновации в технических университетах. Материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 27-30 октября 2015г.) - 2015. - С. 73-74
- [3] Рузанкина Ю.С., Васильев О.С., Парфенов В.А. Лазерная обработка металла с целью повышения коррозионной стойкости // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием (Санкт-Петербург, 30ноября-05декабря 2015г.). Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций - 2015. - С. 114-116
- [4] Рузанкина Ю.С., Васильев О.С., Вейко В.П., Гришканич А.С. Повышение коррозионной стойкости труб нефтепроводов методами фотоники // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015). IX Санкт-Петербургская межрегиональная конференция (Санкт-Петербург, 28-30октября 2015г.): Материалы конференции - 2015. - С. 249-250

УДК 004.942; 621.165; 621.313.126

Е.В. Тумакова, А.С. Комшин

ВНЕДРЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИЕ

Тумакова Екатерина Владимировна, аспирант, ассистент каф. «Метрология и взаимозаменяемость», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва.

Тел.: 8(916)094-67-75, e-mail: tumakova_ekaterina91@mail.ru

Александр Сергеевич Комшин, к.т.н., доцент каф. «Метрология и взаимозаменяемость», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва. Тел.: 8(499)267-09-94, e-mail: komshin_as@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены основные проблемы и задачи оценки текущего технического состояния металлорежущего оборудования, включая требования точности, оценки точности обработки. Показаны технологические преимущества и возможности

фазохронометрической технологии для оценки текущего технического состояния станков и их элементов, режущего инструмента, оценки качества поверхности обрабатываемых деталей.

Ключевые слова: измерения, точность, математическое моделирование, оценка технического состояния, фазохронометрия, диагностика.

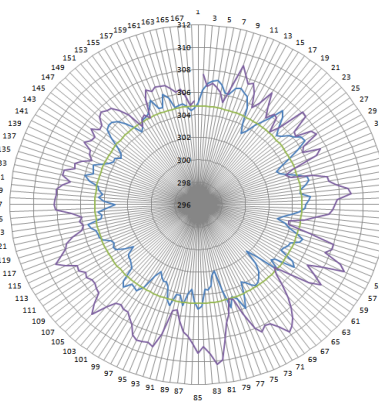
Современные автоматизированные технологические системы не могут в полной мере диагностироваться в процессе эксплуатации при использовании традиционных подходов. [1] В связи с этим нужны новые подходы в экспериментальных исследованиях и уточненные методы расчета динамики станков в режиме функционирования на основе многофакторных и уточненных математических моделей. [2]

Для рациональной и экономически обоснованной эксплуатации обрабатывающего оборудования необходимо следующее [3,4]:

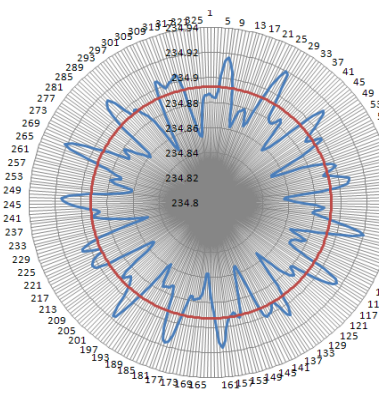
- диагностика текущего технического состояния оборудования;
- переход от системы планово-предупредительных ремонтов к системе ремонтов по текущему техническому состоянию;
- научно обоснованная оценка остаточного ресурса;
- прогнозирующий мониторинг безаварийной работы станка;
- надежная аварийная защита.

Возможность получения новых, прорывных научных (научно-технических) результатов, соответствующих мировому уровню, и их востребованность в масштабах мировой науки (экономики) обеспечена фундаментальными достижениями хронометрии, достигнутыми в астрономии и других науках. Погрешность измерения интервалов времени в условиях эксплуатации не более $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ с, что соответствует, например, для металлорежущего станка относительной погрешности $1 \cdot 10^{-5} \%$ от номинального периода частоты шпинделя при резании (1500 об/мин). [4]

На рисунке 1 приведен пример получения диагностической информации.



а) Экспериментальная хронограмма
(измерения)



б) Хронограмма математической
модели (моделирование)

Рисунок 1 – Результат получения диагностической информации путем сравнения результатов измерения и математического моделирования

Сравнительный анализ рисунка 1 показывает одинаково «рваный» характер обработки данного материала (ШХ15) режущей пластиной Т15К6. Отличие в результатах математического моделирования и эксперимента связаны с отличием реальных условий измерений и математического моделирования. На основании результатов измерений (а) производят уточнение параметров математической модели объекта (б).

Дополнительный вклад в нестабильность резания вносит электромеханическое воздействие системы ротор-статор электрического привода, проявляющееся в возникновении дополнительных гармонических составляющих, нарушениях равномерного вращения при резании.

Возможности использования метода рассмотрены на примере информационно-измерительной системы для электрических и механических параметров асинхронного электродвигателя АИР-56В2У3.

Функциональная схема информационной измерительной системы для электродвигателя состоит из датчика угловых перемещений (энкодера), устанавливаемого на валу электродвигателя с помощью спроектированной оснастки. Измерительный импульс от датчика передаётся в блок измерения интервалов времени и кодирования для дальнейшей передачи в ЭВМ. Для

измерения силы тока и напряжения к «клеммной коробке» электродвигателя подключаются два мультиметра регистрирующих фирмы FLUKE, сигналы от которых передаются в ЭВМ. [5,6]

Математическое моделирование, описывающее работу электродвигателя, обеспечивает отработку критических режимов, имитацию возможных дефектов функционирования системы, построение аварийных сценариев разрушения, отработку конструкции и др. Имитационное математическое моделирование электродвигателя экономит время на конструкторско-технологическую отработку изделия и уменьшает неопределенность знаний об объекте.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных **МК-3625.2015.8**. Отдельные результаты поддержаны в рамках **НИР 9.1265.2014/К** по выполнению проектной части государственного задания в рамках научной деятельности (код проекта 1265).

Литература

1 Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев [и др.]. Под ред. С.Н. Григорьева. М: Машиностроение, 2011. 600с.

2 Комшин А.С., Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Оценка технического состояния станка УТ16П фазохронометрическим методом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 2. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/532755.html> (дата обращения 6.02.2013).

3 Сабиров Ф.С. Повышение эффективности станков на основе их диагностирования и определения виброустойчивости в рабочем пространстве: дисс. док. техн. наук. М. 2009. 255 с.

4 Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // Приборы, 2014. № 5. С. 18-22.

5 Тумакова Е.В., Комшин А.С. Перспективы развития и основные проблемы в области диагностики электромеханических систем // Сборник докладов Восьмой Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. С. 137-140.

6 Ермаков К.С., Тумакова Е.В. Информационно-измерительная система для контроля электрических и механических параметров электродвигателя // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 10. С. 171-180.

E.V. Tumakova, A.S.Komshin

THE INTRODUCTION OF MEASURING PHASE-CHRONOMETRIC TECHNOLOGY IN MECHANICAL ENGINEERING

Bauman Moscow State Technical University, Russia.

Abstract

In work the main problems and problems of an assessment of the current technical condition of the metal-cutting equipment, including requirements of accuracy, an assessment of accuracy of processing are considered. Technological advantages and possibilities of phase-chronometric technology to an assessment of the current technical condition of machines and their elements, the cutting tool, an assessment of quality of a surface of processed details are shown.

Keywords: measurements, accuracy, mathematical modeling, assessment of technical condition, phase-chronometric, preliminary treatment.

**МАРКИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ
С УПРУГИМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ**



Андрей Александрович Козлов, ассистент
Липецкий государственный технический университет,
Россия, г. Липецк,
Тел.: (4742) 32-81-86; e-mail: soy4astnik@mail.ru



Александр Михайлович Козлов, д.т.н., профессор
Липецкий государственный технический университет,
Россия, г. Липецк,
Тел.: (4742) 32-81-85; e-mail: kam-48@yandex.ru

Аннотация

Маркирование ответственных деталей становится частью технологического процесса их изготовления. Метод электрохимического маркирования образует на поверхности детали углубления, что может стать концентратором напряжений. При маркировании металлических поверхностей, имеющих защитное диэлектрическое покрытие по существующим технологиям это покрытие удаляют, а после нанесения информационного массива – восстанавливают.

Предлагается проводить маркирование поверхностей с упругим диэлектрическим покрытием растровым электродом-инструментом с использованием реологической жидкости без нарушения целостности покрытия.

Ключевые слова: маркирование, эластичное диэлектрическое покрытие, реологическая жидкость

Нанесение маркировочных знаков на поверхности деталей с целью их идентификации широко используется в промышленности. Для современного производства, где изготовление продукции ведется партиями и требуется

нанесение переменной информации, предложено использовать растровый инструмент, стоящий из нескольких отдельных элементов [1-3].

Для защиты металлические поверхности от контакта с агрессивной средой используют лаки, краски, полиуретан, резину. До настоящего времени такие покрытия при маркировании разрушались [4-6] и после окончания процесса их приходилось восстанавливать.

Наиболее распространенным способом нанесения знаков на металлические поверхности является электрохимическое маркирование. Однако этот процесс сопровождается образованием углублений на поверхности детали, которые могут стать концентраторами напряжений.

Была выдвинута гипотеза, что для эластичных материалов при большом давлении струи, создаваемой, например инжекторами, можно обеспечить временное раскрытие покрытия для прохождения жидкости к зоне обработки. При этом под действием упругих сил покрытия отверстие закрывается, а попавшая жидкость в герметичном пространстве не нарушает качества поверхности под покрытием.

В последнее время все большее внимание уделяется применению для реализации различных процессов в машиностроении свойств реологической жидкости [7, 8]. Экспериментально доказано, что контур знака на внутренней поверхности покрытия можно получить, используя реологические жидкости с металлическим наполнителем, которые под действием локального электрического поля формируют информационный массив [9].

Исследования показали, что плотный прижим сопла к покрытию (рис. 1, кривая 1) позволяет подавать рабочую среду под покрытие толщиной до нескольких миллиметров. Это возможно, если жидкость дозируется и адгезия покрытия к металлической основе детали не значительна. При высокой адгезии (лаки, краски, эмали) сопротивление от упругих сил (прочность растяжения) может оказаться недостаточной для отрыва покрытия, поэтому потребуется значительно снизить толщину слоя, рекомендованного на рис.1.

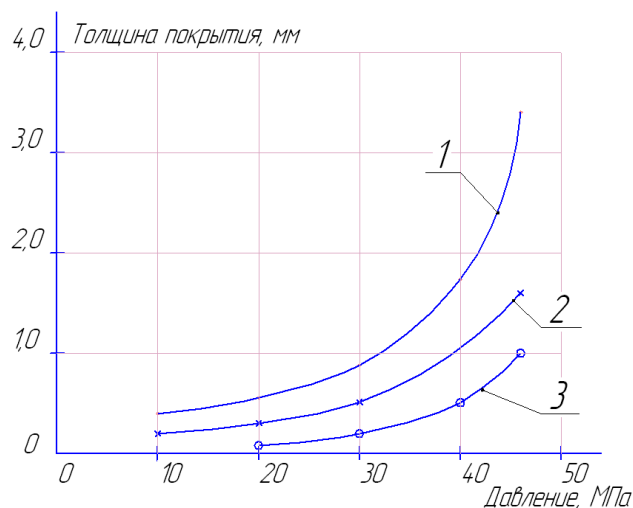


Рис. 1. Связь толщины покрытия и величины давления рабочей среды для отрыва покрытия

Обычно при маркировании (особенно труднодоступных мест) сопло инъектора размещают на некотором удалении от объекта (кривые 2 и 3 на рис. 1).

При расчете режимов выполнения операции маркирования целесообразно ограничить объем рабочей среды с учетом ее потребности только на нанесение индексов (в зависимости от количества, высоты знаков и др.) Излишек жидкости, который может оказаться между покрытием после его регенерации к металлической основной детали, нежелателен, т.к. он нарушает адгезию покрытия, может вызвать коррозию в месте нанесения информации.

Установлено [10], что поверхности с развитым микрорельефом, т.е. имеющие максимальное количество пиков, лучше других удерживают жидкость. Однако проведенные эксперименты показали, что реологическая жидкость хорошо удерживается в месте локального действия магнитного поля (по контуру знаков) и нанесенная информация стойко сохраняется в первоначальном виде даже на полированных ($Ra < 0,16$ мкм) поверхностях.

Контрастность знаков зависит от толщины на них слоя реологической жидкости с высокой объемной концентрацией ферромагнетиков (рис. 2).

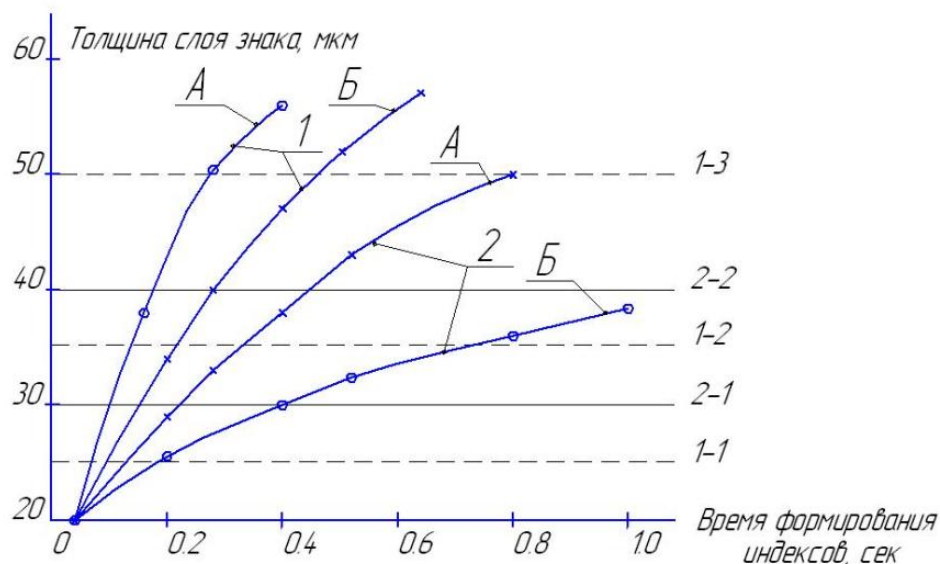


Рис. 2. Растровое маркирование материала с эластичным диэлектрическим покрытием (толщина 0,3 мм) при получении выпуклых знаков на металлической немагнитной детали с толщиной покрытия:

1 - тонким (0,05-0,1 мм); 2 - толстым (0,3 -0,5) мм.

Частота импульсов: А - 400 Гц, Б - 500 Гц.

Граница читаемости информации: 1-1 - на стали;

2-1 - на резиновом покрытии; 3-2 - на лакокрасочном покрытии

Как следует из рис. 2, толщина выпуклого знака зависит от вида эластичного покрытия и интенсивности действия магнитного поля.

Для тонких покрытий нарастание толщины контура знаков на немагнитных металлах идет интенсивнее, т.к. здесь упругое сопротивление покрытий в меньшей степени тормозит образование штриха. Частота подачи импульсов для создания магнитного поля, формирующего профиль знаков, существенно влияет на их толщину, которая определяет контрастность (читаемость) информации. Увеличение частоты повышает качество маркирования, хотя и усложняет конструкцию источника тока.

Для немагнитных материалов информация может наноситься на металл под слоем покрытия или же на внутреннюю поверхность покрытия. При маркировании нержавеющей стали толщина слоя покрытия на ней,

формирующего знаки, должна быть не менее 30 мкм - граница 1-1; для титановых материалов – 35 мкм (граница 1-2); для алюминиевых сплавов 40-50 мкм (граница 1-3), т.к. в последнем случае слабо контрастная реологическая жидкость на базе воды требует формирования более высоких выступов по контуру знаков, увеличивающих читаемость информации.

Если информация наносится на внутреннюю часть эластичного диэлектрического покрытия (например, в случае маркирования немагнитных материалов), то толщина слоя контура знаков (как правило, имеющих зеркальное отображение) зависит от цвета материала покрытия: на темной резине она составляет около 30 мкм (линия 2-1 на рис. 2; для цветных эмалей, красок – несколько больше (линия 2-2).

Реологическая жидкость может формировать знаки с толщиной в несколько десятых долей миллиметра, но имеются детали (например, обрезиненные), где слой резины измеряется десятками миллиметров и более. Тогда потребуется весьма высокое давление жидкой рабочей среды (рис. 2) и целесообразнее использовать для этого металлические иглы специальной конструкции, не вызывающие разрыва эластичного покрытия. Для этой цели применяется метод [11] групповой заточки игл электроабразивным методом, не нарушающим режущую кромку и не вызывающим образования заусенцев. Получение режущей части каплевидной формы дает возможность выполнять проколы в эластичных материалах без разрезания кромок с последующим полным перекрытием отверстия за счет упругих свойств покрытий. В рассматриваемом случае после прокола поверхностного слоя под давлением подается (например, игольчатым инъектором) нормированная доза жидкости в пространство под металлической основой детали, после чего растровым инструментом из сплошных стержней под покрытием формируется магнитное поле по контуру знаков, обеспечивающих получение информации с требуемой контрастностью. Такая информация удерживается эластичным покрытием, а излишек жидкости с малым содержанием ферромагнетиков

испаряется или распределяется под покрытием, не нанося вреда созданной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев В. П., Смоленцев Г. П., Квасова Л. В. Способ растрового маркирования металлов информацией с переменной шириной штриха и устройство для его осуществления / Патент России №2284882. 2006. Бюл. №28
2. Смоленцев В.П., Козлов А.А., Смоленцев Е.В., Козлов А.М. Устройство для электрохимического маркирования поверхности металлической детали под упругим диэлектрическим покрытием и способ с его применением / Патент России №2542216. 2015. Бюл. №5
3. Козлов, А.А. Расчет и проектирование инструмента для растрового маркирования / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, Г.Н. Климова // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2013. № 6. - С. 38-42
4. Осеков А.Н. Комбинированное маркирование деталей с диэлектрическим покрытием / А.Н. Осеков, И.Ю. Кузнецов, А.М. Козлов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2011. №4 (288). – С. 93-99
5. Козлов А.М. Нанесение надписей на металлические поверхности с вязким электроизоляционным покрытием / А.М. Козлов, А.Н. Осеков // Вести высших учебных заведений Черноземья – 2011, №2 (24). - С. 96-100
6. Смоленцев В.П. Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. - Москва: Машиностроение, 1983. – 72 с.
7. Болдырев А.А. Повышение точности базирования деталей реологическими средами с переменной плотностью / А.А. Болдырев, В.П. Смоленцев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №6. - С. 29-33.
8. Смоленцев В.П. Механизм управления процессом базирования индивидуальных заготовок в реологической жидкости / В.П. Смоленцев, А.А. Болдырев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. №2/3 (292). - С. 56-60.

9. Козлов А.А. Нанесение информации на металлические детали с покрытиями с использованием реологической жидкости / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. Т. 9. №6.1. - С. 59-63

10. Козлов А.А. Подготовка поверхности деталей с диэлектрическим покрытием под электрохимическое маркирование / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, А.М. Козлов, Б.И. Омигов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. №3-1. - С. 73-76

11. Некрасов А.Н. и др. Способ заточки пустотелых колющих медицинских инструментов / Патент России №2237569. 2004. Бюл. №28

MARKING ITEMS WITH ELASTIC DIELECTRIC COATED WITH REOLOGICAL FLUID

Andrey Kozlov, Assistant

Lipetsk State Technical University,

Russia, Lipetsk,

Tel .: (4742) 32-81-86; e-mail: soy4astnik@mail.ru

Alexander Kozlov, Professor

Lipetsk State Technical University,

Russia, Lipetsk,

Tel .: (4742) 32-81-85; e-mail: kam-48@yandex.ru

Abstract

Marking of critical parts becomes part of the process of their manufacture. electrochemical marking method forms on the surface of recess parts that could become a stress concentrator. When marking of metal surfaces with a protective dielectric coating on the existing technologies the coating is removed, and after the application information file - restore.

It is proposed to carry out the marking of surfaces with an elastic dielectric-coated electrode-raster tool using rheological fluid without disturbing the integrity of the coating.

Keywords: marking, flexible dielectric coating, rheological fluid

**Лазерная микро инженерия поверхности металлов и изменение
поверхностных свойств объекта**

Олег Сергеевич Васильев, аспирант, Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, tesla_90@mail.ru, +7 (950) 0419019

Юлия Сергеевна Рузанкина, студент, Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, ruzankinajulia@gmail.com, +7 (921) 4249776

Abstract.

This paper presents a method for the metal surface micro structuring with the radiation of pulse fiber laser. The specified topographic relief was modeled in a graphical editor and made on a metal surface. Three stages of the micro structuring process were described in this work: profiling, cleaning and polishing. It was also presented the examples of the produced microstructures that are possessed different properties: geometrical, optical, adhesion, hydrophobic and so on. The technology of transfer for the relief with the rolling mill was developed as well. And it was investigated the ability to change hydro - physical properties of the material.

Keywords: microgeometry, fiber laser, microstructuring, surface properties, surface engineering

Введение.

Хорошо известно, что физико-химические свойства поверхности (механические, химические, оптические и др.) в значительной мере определяются ее микрогеометрией. Машиностроительные, биомедицинские, декоративно-прикладные и другие отрасли промышленности нуждаются в технологиях микро структурирования, так как они позволяют улучшить те или иные эксплуатационные характеристики поверхности (износостойкость, коэффициент трения, адгезионная способность, коррозионная стойкости, электрическая прочность и др.). Сравнительно новым методом формирования микрорельефа поверхности, является лазерная микро обработка. В данной работе основное внимание уделяется формированию микроструктур правильной геометрической формы, с характерными величинами высотных и

латеральных параметров. Целью данной работы является создание микрогеометрических структур на поверхности металла и оптимизация режимов лазерного излучения при формировании топографии. Для создания поверхностных структур использован метод лазерной микро абляции.

Схема установки.

Эксперимент проводился на базе установки для прецизионной лазерной маркировки с импульсным волоконным лазером и сканаторной системой наведения светового луча.

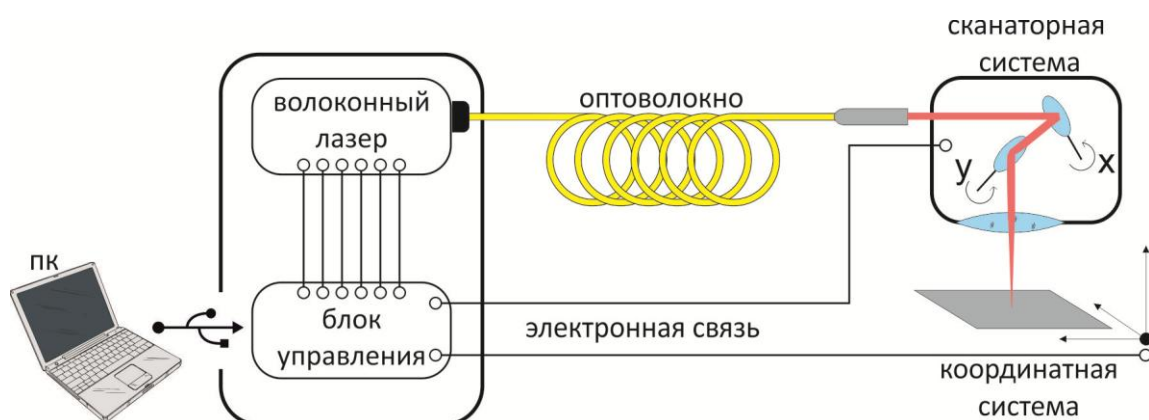


Рис.1 Принципиальная схема установки

Длина волны излучения (λ) - 1064 нм, Средняя мощность излучения (P_{cp}) - до 20 Вт, Максимальная скорость перемещения пучка света (V_{max}) - 2000 мм/с, Частота повторения импульсов (f) - 20-100 кГц, Длительность импульса (τ) - до 200 нс, Диаметр пучка в фокусе - ~30 мкм, Энергия в импульсе - 1 мДж,

В графическом редакторе создаётся изображение в оттенках серого цвета. Программа разбивает изображение на 256 слоёв. Каждый слой обрабатывается отдельно и имеет свои границы изображения. В результате, более тёмные части изображения будут обрабатываться большее количество раз, а, следовательно, иметь наибольшую глубину.

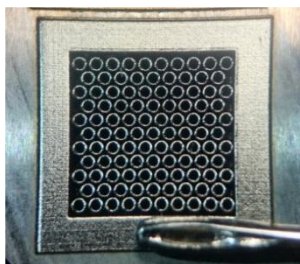
Процесс структурирования в данной работе предложено осуществлять в 3 стадии.

Первая стадия – абляции - 3D-удаление поверхностных слоёв. Толщина удалённого слоя (H) может достигать 300 мкм за один проход лазерного излучения по зоне обработки.

Цель второй стадии – очистка материала от продуктов горения материала с поверхности металла после процесса абляции.

Третья стадия – полировка поверхности - характеризуется снижением шероховатости поверхности обрабатываемого материала.

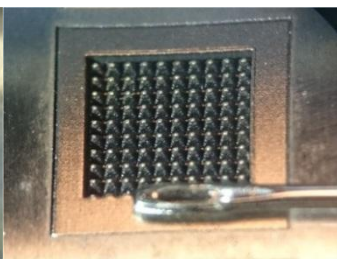
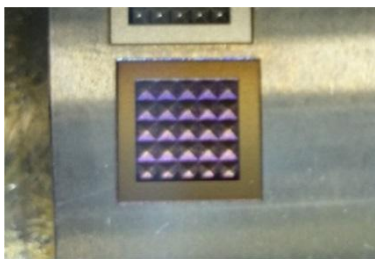
Результаты эксперимента.



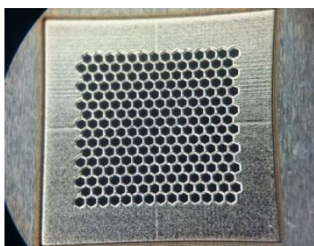
Торы: подобная структура применяется для фиксации микро-элементов, формировании печатных плат, в ювелирной промышленности. Толщина дуги тора 100 мкм.



Набор полусферных выпуклых шестигранников. Диаметр одного элемента 1 мм. Применяется для понижения электро- восприимчивости поверхности и понижения уровня загрязнения поверхности.



Пирамидальные микроструктуры различных форм предназначены для изменения угла отражения падающего света. Или изменения свойств падающей световой или акустической волны.



Сотовая микроструктура с толщиной стенки перекрытия 100 мкм. Отпечаток подобной структуры применяется для отвода жидкости от зоны трения

Перенос микрорельефа методом холодного тиснения.

При современных темпах производства, локальное изготовление микроструктур становится не практичным. Необходимо расширить технология до производства в промышленных масштабах. Решением стало применение прокатных станов. В работе микроструктура изготавливалась на прокатных валах или отдельных пластинах. Было предложено изменить поверхностные механические свойства опорного вала.

Рис 2.

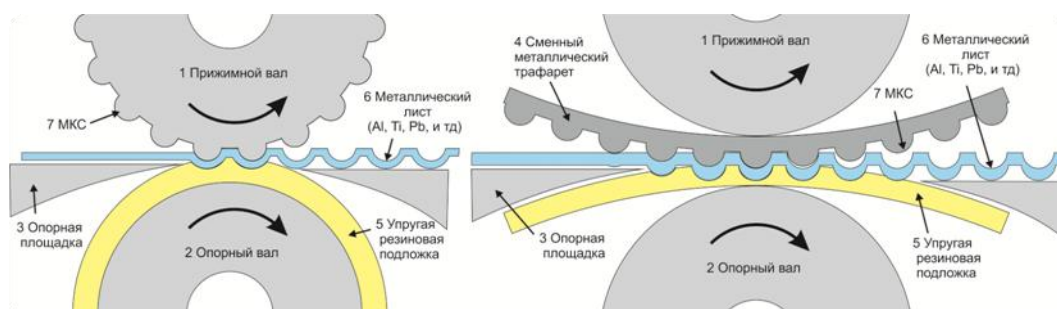


Рис. 2. Общая конструкционная схема установки тиснения



Рис 3. Образец фольги, полученный методом холодного проката

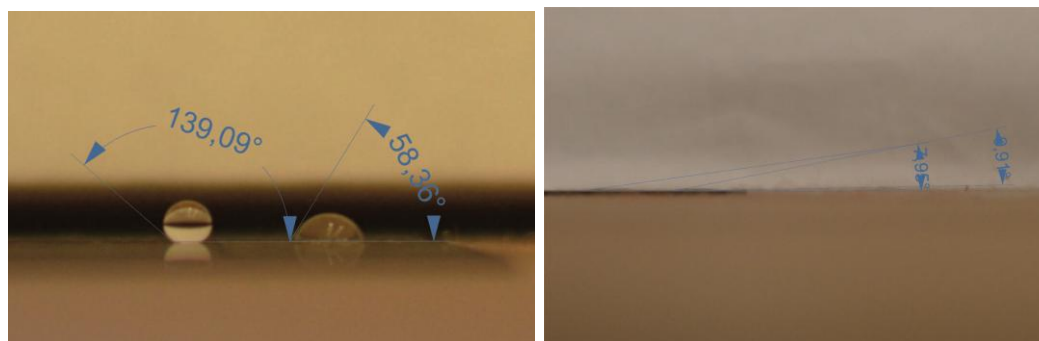
Исследование возможности управления гидрофизическими свойствами.

Для проведения экспериментов были поставлены следующие задачи:

1. Полагаясь на литературный источник, определить вид и тип поверхностной микроструктуры, обладающей свойствами высокой адгезии и гидрофобности.
2. Используя разработанную ранее технологию микро структурирования, создать топографическое изображение на поверхности металлической пластины.
3. Провести измерения гидрофобности и адгезии изготовленных поверхностей.

Гидрофобность и адгезия измерялись классическим методом замера угла смачивания капель воды поверхности материала. Капля дистиллированной воды будет формироваться обычным медицинским шприцом. В момент критического накопления объема, капля отделится и с фиксированной высоты упадет на поверхность. После чего, сделав ряд фотографий, можно в графическом редакторе померить искомый угол.

В результате были получены поверхности, обладающие как высокими гидрофобными, так и высокими гидрофильными свойствами. На рисунке представлены некоторые поверхности, обладающие различными гидрофизическими свойствами.



№	угол α [°]	τ [нс]	V [мм/с]	P [%]	f [КГц]	N [л/мм]	повтор	заливка	угол α^* [°]	угол α_0 [°]
41	7,95	4	25	95	20	20	1	линейная	139,09	64,553
118	2	4	25	95	20	10	6	линейная	25,99	64,553

В таблице представлены параметры лазерной установки и результаты гидрофобных и гидрофильных свойств.

Вывод.

В проведенной работе сформирована технология микро структурирования поверхности. Получены поверхностные рельефы различных типов. Существенно, что, изменяя поверхностную топографию металла, можно модифицировать различные свойства поверхности: механические, оптические, электрические и т.д., при этом каждый материал, конечно, требует индивидуальных параметров лазерной обработки. Разработана экспериментальная установка производства микроструктур в промышленном масштабе. Для материалов разных толщин определены

параметры поверхности прокатных валов. Так же, получены определённые результаты создания поверхностей с гидрофобными и гидрофильными свойствами. Исследуемая технология изменения поверхностных свойств объекта. Может применяться в промышленности, что позволит решить ряд производственных задач.

Литература:

1. Васильев О.С., Вейко В.П., Горный С.Г., Рузанкина Ю.С. *Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера. СПб, Оптический журнал, выпуск 12, том 82, декабрь 2015. стр. 70-77*
2. Veiko V.P. Laser-assisted micro shaping. Laser-assisted Microtechnology (LAM–2000). // Proceedings of SPIE. 2001. V. 4157. P. 93–103.
3. Васильев О.С., Горный С.Г. *Технология создания поверхностных микроструктур на листовых материалах с использованием волоконного лазера. «Металлообработка» Выпуск №3, июнь 2016.*
4. Veiko V.P., Metev S.M. Laser assisted microtechnology. Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 270 с.

РАЗДЕЛ 3

Повышение эффективности машиностроительного производства

Обеспечение качества выполнения государственного оборонного заказа в условиях дискретного производства

¹Дмитрий Петрович Гасюк, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (911) 281-72-07, E-mail: cz_tipt@mail.ru.

²Елена Олеговна Касяненко, студент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (981) 953-00-25, E-mail: easy92@mail.ru

Аннотация

Дискретное производство - это вид позаказного производства, в котором объем выпуска продукции от заказа к заказу и временной интервал между заказами - случайны. Данное производство реализуется в подавляющем большинстве промышленных предприятий мира. Даже там, где выпуск продукции носит исключительно непрерывный характер в производстве и могут носить дискретный характер. Анализ современных условий ведения производственной и хозяйственной деятельности отечественных предприятий позволил выявить особенности современных условий организации производства, предпосылки возникновения и сущность дискретного производства, которое все в большей мере претендует на самостоятельный вид производства. В современных условиях все без исключения производственные компании должны управлять продажами, производством, качеством и закупками, реагировать на колебания рынка, интенсивнее разрабатывать новые продукты, вести мониторинг и сокращать издержки. Однако предприятия, задающие темп в отрасли, отличаются от тех, которые лишь выживают, одним: они постоянно работают над созданием новых возможностей для бизнеса и оптимизацией издержек. В настоящий момент это возможно только с применением системного анализа, статистических методов, непрерывного мониторинга хозяйствующей деятельности предприятия в условиях позаказного производства. В данной статье изложены проблемы дискретного производства и возможные пути их решения в условиях позаказного производства, путем внедрения тенденции привлечения малого и среднего бизнеса в структуру исполнителей гособоронзаказа. Целью статьи является выбор и обоснование оптимального способа исполнения гособоронзаказа, путем распределения работ между головным исполнителем и привлекаемыми организациями малого и среднего бизнеса, это позволит сократить затраты и сроки выполнения гособоронзаказа, а также повысить качество продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОБОРОННЫЙ ЗАКАЗ, ДИСКРЕТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, МАЛЫЙ БИЗНЕС, ЗАКУПКИ, ПРОИЗВОДСТВО

Введение

Анализ современных условий ведения производственной и хозяйственной деятельности отечественных предприятий позволил выявить особенности современных условий организации производства, предпосылки возникновения и сущность дискретного производства, которое все в большей мере претендует на самостоятельный вид производства.

В настоящий момент это возможно только с применением системного анализа, статистических методов, непрерывного мониторинга хозяйствующей деятельности предприятия в условиях позаказного производства.

В данной статье изложены проблемы дискретного производства и возможные пути их решения в условиях позаказного производства, путем внедрения тенденции привлечения малого и среднего бизнеса в структуру исполнителей гособоронзаказа. Целью статьи является выбор и обоснование оптимального способа исполнения гособоронзаказа, путем распределения работ между головным исполнителем и привлекаемыми организациями малого и среднего бизнеса, это позволит сократить затраты и сроки выполнения гособоронзаказа, а также повысить качество продукции.

Особенности современных условий ведения производственной и хозяйственной деятельности отечественных предприятий, прежде всего, определились изменениями социально-экономических условий произошедших в начале 90-х годов прошлого столетия, к которым следует отнести следующие основные изменения:

- расслоение собственности и приобретение частной собственностью определяющего статуса;
- приобретение российскими предприятиями самостоятельности и независимости в выборе основных видов производственной и хозяйственной деятельности;
- изменение юридических и экономических основ управления выбранными производственной и хозяйственной видами деятельности, приобретение предприятиями юридического статуса и ориентация на потребителя;
- расширение спектра решаемых руководителем предприятия задач, сопровождаемое объективной необходимостью внедрения международной практики управления предприятием, основанной на реализации научных принципов менеджмента.

Задачи

Задачами исследования являются:

1. Увеличение доли малых и средних предприятий в участии в гособоронзаказе;

2. Обеспечение оптимального распределения задач, указанных в госконтракте и технической документации;
3. Сокращение издержек и сроков выполнения гособоронзаказа;
4. Применение инновационных методов и способов изготовления продукции, товаров, услуг, указанных в госконтракте и технической документации.

Методика исследования

Исследования проводились с применением системного анализа, статистических методов, непрерывного мониторинга хозяйствующей деятельности предприятия в условиях позаказного производства.

Развитие дискретного производства в России

Зарождение и развитие *частной собственности* потребовало коренной перестройки всего механизма управления экономикой России.

Во-первых, в существенной степени был утрачен опыт отечественными производителями управления предприятием на основе частной собственности. Потребовалось формирования принципиально новой мотивации персонала частных предприятий. В основе формирования мотивации персонала был положен процесс распределения полномочий и ответственности, формирования персональной заинтересованности в результатах своего труда. ***Переход от коллективной к персональной ответственности каждого за результаты своей профессиональной деятельности.***

Во-вторых, возникла объективная необходимость юридического подтверждения отношений с партнерами, поставщиками и заказчиками. В основе данных отношений было положено юридическое закрепление прав и ответственности предприятия за свои обязательства перед заказчиками, поставщиками и партнерами. Было принято решение формирования государственного реестра регистрации данных предприятий по их наименованию, адресу пребывания и банковским реквизитам.

Данная процедура регистрации частных предприятий приобрела статус юридической регистрации, сопровождаемой формированием предприятий как ***юридических лиц***.

С момента приобретения предприятиями статуса юридических лиц отношения с заказчиками, поставщиками и партнерами стали выстраиваться как отношения между юридическими лицами ***на основе взаимного письменного обмена условий договоренности***, прав и ответственности друг перед другом с указанием признаков юридического лица в виде контракта

(договора). Наличие такого документа позволило, при необходимости, привлекать третичное лицо для разрешения разногласий.

Для реализации данной процедуры была разработана и принята соответствующая законодательная база. Приобретение предприятиями статуса юридических лиц на законном основании позволило предприятиям **самостоятельно и независимо выбирать виды производственной и хозяйственной деятельности.**

В свою очередь, данная процедура обеспечила расширение поля предложений по одним и тем же видам деятельности различных предприятий, что закономерно породило первые признаки **конкурентного отбора** исполнителя того или иного вида деятельности.

Изменение юридического статуса предприятий потребовало серьезных нормативно-правовых изменений в организации выполнения Государственного оборонного заказа (ГОЗ). Так, 21 июля 2005г. был принят Федеральным законом № 94-ФЗ «О размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных и муниципальных нужд », который впоследствии сменился Федеральным законом от 5 апреля 2013 г. N 44-ФЗ "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" (с изменениями и дополнениями), в соответствии с которым участником размещения ГОЗ может быть любое юридическое лицо независимо от организационно-правовой формы, формы собственности, места нахождения и места происхождения капитала или любое физическое лицо, в том числе индивидуальный предприниматель. На сегодняшний день доля малых и средних предприятий не превышает 2-3% в исполнении ГОЗ.

В-третьих, участие в конкурентном отборе, в условиях участия нескольких претендентов на выполнение одной и той же работы, объективно потребовалось подтверждение способности предприятия справиться с данной работой перед заказчиком. Зародилась конкурентная среда, оказавшая существенное влияние на изменение приоритетов во взглядах на мотивацию производственной и хозяйственной деятельности предприятий, на определяющую роль заказчика в этой деятельности. В соответствии с выше названным законом ГОЗ организуется только на конкурсной основе.

С расстановкой приоритетов, и предпочтения предприятий «ставить» потребности потребителя на первое место, **основной особенностью производственной и хозяйственной деятельности предприятия стало позаказное производство**, отражающее определяющий приоритет – существующие и предполагаемые потребности заказчика, максимальное удовлетворение его потребностей.

Определяющей особенностью позаказного производства является строгое нормирование ресурсов, в том числе временных и финансовых. В

связи с этим такая организация производства получила распространение как **дискретная (нормированная, ограниченная, регламентированная) организация**, а следовательно и производство стало называться – **дискретным**.

В данных условиях стремление добиться многократного использования отлаженного и освоенного производства продукции становится не актуальным. Реализация принципа **«Ориентации на потребителя»** в условиях дискретного производства объективно требует от производителя **быть готовым оперативно перестраивать технологическое наполнение производства от заказа к заказу**, чтобы привлечь внимание потребителя, обеспечить конкурентоспособность производственной деятельности. Такой подход обеспечивает участие в выполнении ГОЗ наиболее технологически состоятельных предприятий, что является труднодостижимым для малых и средних предприятий. К тому же, для большинства малых и средних предприятий, явным барьером чтобы стать участником торгов по ГОЗ можно считать предквалификацию участников торгов, что предусмотрено законодательством. Несмотря на то, что есть необходимость развивать подходы к участию малого и среднего бизнеса и ГОЗ. На текущий момент было принято решение Правительства РФ об утверждении перечня юридических лиц, которые обязаны закупать инновационную и высокотехнологичную продукцию у субъектов малого и среднего предпринимательства, закрепленное распоряжением № 475-р от 21.03.2016. Среди вошедших в список 90 предприятий есть представители оборонно-промышленного комплекса. Такие как АО "Научно-производственная корпорация "Уралвагонзавод", АО "Швабе – Оборона и Защита", ОАО "Концерн Калашников" и другие.

В-четвертых, стремление своевременно и качественно удовлетворить потребности заказчика порождают необходимость поиска новых приемов и способов организации производственного процесса. Объективно возникает необходимость **перехода от последовательной схемы к параллельной схеме подготовки производства**.

Реализация такой схемы может привести к стиранию условных границ стадий жизненного цикла продукции, т.к. в условиях стадии жизненного цикла «Проектирования и разработка» требуется принципиальное решение вопросов опытного производства, а в условиях стадии жизненного цикла «Производство» - решение вопросов опытной эксплуатации. Данный подход позволяет оперативно учесть все большее сокращение продолжительности жизненного цикла в связи с положительной динамикой растущих

потребностей заказчика, а в условиях ГОЗ положительной динамикой требований к техническому уровню образцов вооружения.

Особенностью данного подхода в планировании и организации производственного процесса является концентрация существенных ресурсов в ограниченных временных интервалах времени, которых не всегда достаточно у развивающихся частных предприятий. Появилась объективная потребность поиска новых форм объединений усилий отдельными предприятиями для достижения взаимных интересов, новых форм управления объединенными ресурсами. К таким относятся объединения в корпорации, холдинги, консорциумы.

На территории РФ была признана и законодательно закреплена **процедура сертификации** как единственный способ подтверждения соответствия систем менеджмента предприятий требованиям стандартов. Была введена **процедура аутентичного перевода международных стандартов**, изменен статус **государственных стандартов на национальные стандарты**. В период времени с начала 2000-х тысячных годов началась активная процедура актуализации российских стандартов. Наличие сертифицированных систем менеджмента качества на предприятиях - участниках ГОЗ после принятия Постановления Правительства РФ № 629 от 17 августа 2010 г. и № 861 от 26 октября 2010 г. стало обязательным требованием Государственного заказчика.

В данных условиях развития отечественной экономики существенно изменилась структура сформировавшегося за последнее десятилетие оборонно-промышленного комплекса (ОПК). В условиях перехода к рыночной экономике многие предприятия отечественного военно-промышленного комплекса (ВПК) были переориентированы на выпуск гражданской продукции, а также внедрили двойные технологии. Значительная часть федеральных государственных унитарных предприятий была переведена в частную форму собственности, что позволило сохранить и эффективно использовать в условиях рыночной экономики производственного, кадрового и инновационного потенциала оборонных отраслей. На данный момент в структуре собственности ОПК РФ преобладают акционерные общества (их доля составляет около 57%), причем на 28,2% предприятий оборонно-промышленного комплекса какая-либо доля государства отсутствует /1/.

Полученные результаты

Анализ участников размещения ГОЗ в Северо-Западном регионе свидетельствует о том, что существенную долю участников ГОЗ составляют крупные предприятия. В соответствии с распоряжением Правительства РФ «Об утверждении перечня юридических лиц, которые обязаны закупать

инновационную и высокотехнологичную продукцию у субъектов малого и среднего предпринимательства» № 475-р от 21.03.2016, к 2017 году планируется увеличить долю участия в ГОЗ малых и средних предприятий от 2-3% до 15%. По факту, участие малого бизнеса в НИОКР и ОКР, на данный момент составляет всего 2%. Значительная доля НИОКР приходится именно на разработки по военной тематике. По опыту развитых промышленных государств, доля технологий, которые разрабатывают малые предприятия, составляет более 20% от всего промышленного производства.

Существенным преимуществом данных предприятий является их мобильность, проявляющаяся в активном изучении потребностей заказчика, стремлении наиболее полно их удовлетворять, способности оперативного ведения наукоемких исследовательских и конструкторских работ, а также в интенсивном внедрении инновационных подходов к организации своей хозяйственной деятельности. Такие характерные черты данных предприятий вполне перекликаются с современными взглядами на организацию разработки и производства, перспективных образцов вооружения в рамках ГОЗ.

Однако, наряду с этими преимущественными проявлениями малых предприятий – участников ГОЗ, есть серьезный недостаток – отсутствие значительных ресурсов, позволяющих осуществлять проектирование, разработку и организацию серийного производства образцов ВВТ на основе традиционных способов.

Крупные компании или оборонно-промышленные предприятия могли бы закупать отдельные уже готовые изделия, детали и т. д. у малых и средних предприятий, что является механизмом субконтрактации. Итогом данного механизма, может являться экономия средств предприятий-поставщиков ГОЗ на производстве компонентов своей продукции, соответственно снижается ее себестоимость и повышается энергоэффективность предприятия.

В данных условиях малые предприятия вынуждены отказаться от традиционного подхода, и искать более рациональные способы создания новых образцов вооружения. При таком подходе опытное производство в определенных условиях может рассматриваться как основное производство перспективных образцов ВВТ. Однако, наряду с этими преимуществами, есть серьезный недостаток - такой подход не предусматривает приемку качества процесса подготовки опытного производства, что может привести к снижению его стабильности и воспроизводимости.

Кроме того, широко применяемое в условиях дискретного производства **проектное управление** производственной деятельностью предприятия требует строгого соблюдения нормированных ресурсов в рамках договорных отношений с заказчиком и, в первую очередь, временных и финансовых ресурсов. Данные ресурсы в большей степени подвержены минимизации со стороны заказчика. Так, в процессе конструкторской подготовки

производства наиболее распространенным подходом к сокращению времени её реализации является сокращение объема разрабатываемой рабочей конструкторской документации (РКД). Причем, в соответствии с требованиями последней редакции ГОСТ 2.111-68 от августа 2007 г. (ИУС № 9-2006) «Нормоконтроль», п 2.1, 16 **комплектность конструкторской документации проверяется в соответствии с техническим заданием (ТЗ)**. Как свидетельствует практика, зачастую с целью сокращения времени на разработку РКД в ТЗ либо не отражается её состав вообще, либо отражается состав РКД без учета требований ГОСТ 2.102-68 (с учетом ИУС №8-2006). Как правило, из состава документации выпадают документы, существенно влияющие на качество выполнения ГОЗ, такие как: «Ведомость покупных изделий», «Ведомость разрешения применения покупных изделий» и др.

Выводы

Для обеспечения качества выполнения ГОЗ в условиях сложившегося дискретного производства, прежде всего, объективно появилась потребность **в развитии нормативно-правовых и нормативно-технических основ** производственной и хозяйственной деятельности предприятий - участников ГОЗ. Представляется необходимым в процессе развития нормативно-технической основы выполнения ГОЗ, разработки новой версии ГОСТ РВ 15.002 отнормировать требования, в том числе, по минимально допустимому составу РКД, провести гармонизацию ГОСТ РВ 15.203-2001 с требованиями последней версии ЕСКД от 2006 года. Определяющим направлением в реализации данных потребностей является актуализация и гармонизация стандартов семейства СРПП ВТ и, в первую очередь ГОСТ РВ 15.002, со стандартами систем ЕСКД и ЕСТД.

Еще одним требованием для малых и средних предприятий являются дополнения и изменения в Федеральном законе от 29.12.2012 № 275-ФЗ "О государственном оборонном заказе" с изменениями, внесенными Федеральным законом от 29.06.2015 г. № 159-ФЗ, например – требование открытия отдельного счёта от предприятий для каждого оборонного контракта по всей технологической цепочке, вплоть до производителей сырья.

В условии редакции данных требований, малые и средние предприятия, способные осуществлять изготовление и поставку комплектующих к образцам вооружения по незначительной стоимости и малыми партиями, вынуждены отказываться от данных поставок, в связи с тем, что возрастают их издержки на обеспечение выполнения данных требований. В связи с этим, только незначительная часть малых и средних предприятий могут позволить себе открывать отдельные счета в уполномоченных банках по госконтрактам, суммы которых часто сопоставимы со стоимостью обслуживания данных счетов. Между тем оплата будет производиться только на отдельный счет. Как следствие, многие малые и средние предприятия отказываются от участия в выполнении ГОЗ, так как это становится невыгодным. Резкое

увеличение издержек производственного малого и среднего бизнеса ставит его в крайне тяжелое положение.

Как отмечалось выше, в подавляющем большинстве данные предприятия способны доводить весь комплекс работ, в лучшем случае, до опытного производства перспективных образцов ВВТ.

В данных условиях малые предприятия вынуждены отказаться от традиционного подхода, и искать более рациональные способы создания новых образцов ВВТ. При таком подходе опытное производство в определенных условиях может рассматриваться как основное производство перспективных образцов ВВТ при соответствующей актуализированной нормативно-технической базе, позволяющей реализовать параллельный способ конструкторской и технологической подготовки и организации производства.

Наиболее существенным является постоянная перенастройка процесса производства от заказа к заказу, что приводит к изменению факторов влияющих на структуру затрат различных ресурсов, обеспечивающих данные производственные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 29.12.2015 № 275-ФЗ «О государственном оборонном заказе» (с изменениями на 13 июля 2015 года)
2. ГОСТ РВ 15.002-2003 "Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Система менеджмента качества. Общие требования"
3. ГОСТ 2.111-68 от августа 2007 г. (ИУС № 9-2006) «Нормоконтроль»
4. Постановление Правительства РФ № 629 от 17 августа 2010 г. и № 861 от 26 октября 2010 г.
5. Федеральный закон от 5 апреля 2013 г. N 44-ФЗ "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд" (с изменениями и дополнениями)
6. «О состоянии промышленного производства и розничной торговли в январе-октябре 2009 года» www.minprom.gov.ru
7. А.Николаев. Многие наши беды от несовершенства законодательства. Журнал "Российская Федерация сегодня". 2002, №15. Стр. 33-35. Е.Никитенко. О нормативно-правовом обеспечении развития системы вооружений. Вооружения. Политика. Конверсия. №3-5, 1998.Стр.21-22.
8. Бабашкина А.М. «Государственное регулирование национальной экономики»: учебное пособие. – М.: финансы и статистика, 2001г. – 480 стр.
9. В.Пименов. О стратегии реформирования ОПК на современном этапе экономического развития России. Актуальные проблемы свободы вероисповеданий. -М., 2002. Стр. 72.
10. Пак. Приоритеты законодательного обеспечения стабильного функционирования оборонной промышленности Российской Федерации.

11. И.Авсеенко. О ходе реформирования промышленности обычных вооружений. Вооружение. Политика. Конверсия. №2, 2003. Стр.13. Сайт
12. Информация с сайта www.vpk.ru
13. Фатхудинов, Р. А. Производственный менеджмент: учебник / Р. А. Фатхутдинов. – Санкт–Петербург: Лидер, 2011. – 494 с.
14. Фатхудинов, Р. А. Организация производства: учебник / Р. А. Фатхутдинов. – Москва: ИНФРА-М, 2011. – 544 с.
15. Миронова К.А. Система контроля и надзора в исполнительном производстве // Закон и право. – 2013. - № 4. – С. 94–98.

D.P.Gasyuk, E.O. Kasianenko

ENSURING THE QUALITY OF THE EXECUTION OF THE STATE DEFENSE ORDER IN TERMS OF DISCRETE PRODUCTION

Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Discrete manufacturing - this type of order-related production, in which the volume of production from order to order and time interval between orders is random. This production is realized in the vast majority of industrial enterprises in the world. Even where production is exclusively of a continuous nature in the production and may be discrete in nature. The analysis of modern conditions of conducting production and business activities of domestic enterprises has allowed to reveal features modern conditions of production, conditions of emergence and the essence of discrete manufacturing, which increasingly claims to be a separate type of production. In modern conditions without exception, manufacturing companies need to manage sales, production, quality and procurement to respond to market fluctuations, harder to develop new products, monitor and reduce costs. However, the company, which is setting the pace in the industry are different from those that merely survive, one: they are constantly working to create new business opportunities and optimisation of costs. At the moment this is only possible with the use of system analysis, statistical methods, continuous monitoring of economic activity of the enterprise in the conditions of order-related production. This article describes the problems of discrete production and possible ways of their solution in terms of order-related production, by introducing the tendency to attract small and medium business in the structure of executors of the state defence order. The aim of the article is the choice of the optimal method of state procurement by distribution of work between the Prime contractor and engaged by organizations small and medium businesses, this will reduce costs and terms of defence procurement and improve product quality.

KEYWORDS: THE STATE DEFENSE ORDER, DISCRETE MANUFACTURING, SMALL BUSINESS, PURCHASING, MANUFACTURING

К ВОПРОСУ О ЗАСАЛИВАНИИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Попов Вячеслав Юрьевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО "Братский государственный университет", кафедра технологии машиностроения, Россия, Братск. berkutoff@rambler.ru
Янюшкин Александр Сергеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО "Братский государственный университет", заведующий кафедрой технологии машиностроения, Россия, Братск. yanyushkin@brstu.ru

Абразивный круг является основой для большинства шлифовальных операций. От его состояния в процессе резания зависят эксплуатационные характеристики будущего изделия. В результате многолетних и всесторонних исследований учёными всего мира было признано, что серьёзной проблемой на пути достижения максимальной эффективности шлифования встаёт обычный процесс засаливания кругов. Существующие методы обработки даже при воздействии нескольких энергий одновременно не способны дать гарантию активной правки кругов, без временных и экономических потерь. Частично наукой были определены разнообразные способы минимизации засаливания, авторы убеждены в том, что "самым главным" режущим инструментом – алмазным, поиск этих способов всё ещё не закончен.

Ключевые слова: засаливание, комбинированная электроалмазная обработка, алмазный круг, металлическая связка, адгезия.

Современные исследователи констатируют, что, не смотря на то, что круги из кубического нитрида бора менее пригодны для шлифования керамических, сверхтвёрдых, труднообрабатываемых материалов, а также современных инструментальных наноматериалов, но обрабатывающая промышленность вынуждена их использовать там, где предпочтительнее было бы использовать алмаз. И в первую очередь это касается одного из перспективных абразивных инструментов – алмазных шлифовальных кругов на металлической связке, практически не применяемых при шлифовании железоуглеродистых материалов.

На Западе, о том, что процесс засаливания [1] является основной причиной снижения работоспособности абразивного инструмента, начали говорить с конца 70-х годов [2, 3]. Однако отечественными учёными,

подобная проблема была описана несколько раньше [4]. Негативное воздействие, оказываемое засаливанием на технологический процесс, выражается в увеличении сил резания, температуры в зоне контакта, износа шлифовального круга и, как следствие, в дефектах поверхностного слоя обрабатываемой поверхности. Подобное комплексное воздействие способно полностью вывести процесс шлифования из под контроля.

В результате комплексных исследований, проведённых коллективом Братской научной школы за последние десятилетия, было определено несколько путей, способствующих увеличению срока эксплуатации алмазных шлифовальных кругов на металлических связках и, соответственно, повышению качества поверхностного обрабатываемого слоя:

- образование защитных плёнок, препятствующих образованию засаленного слоя [5];
- замена стандартных электролитов на альтернативные смазывающе-охлаждающие жидкости [6];
- разработка и внедрение в эксплуатацию новых прогрессивных конструкций шлифовальных кругов [7-9];
- активная правка шлифовального круга во время шлифования по технологии комбинированной электроалмазной обработки [10];
- комбинированное сочетание вышеупомянутых методов.

Следует отметить, что исследования проводились не только над природой возникновения засаленного слоя [11-15], но и всесторонне анализировался его состав [16-18], раскрывающий благоприятные условия для его блокирования.

Так как адгезионный износ инструмента в результате засаливания является индикатором реальных условий процесса шлифования, то и обрабатываемый материал, и материал инструмента, и технико-экономические показатели операции напрямую зависят от его режущих способностей. В результате были определены три дальнейших направления исследований по обеспечению и повышению качества и

конкурентоспособности изделий машиностроения, позволяющих осуществить комплексное увеличение как качественных, так и количественных характеристик комбинированной электроалмазной обработки.

1. Направление исследований по обеспечению качественных характеристик абразивного инструмента:

- увеличение режущей способности и срока службы абразивного инструмента;
- исключение процесса образования засаленного слоя;
- уменьшение абразивного износа абразивного инструмента.

2. Направление исследований по обеспечению качественных характеристик обрабатываемой поверхности:

- минимизация структурных изменений в поверхностном обрабатываемом слое;
- уменьшение шероховатости обработанной поверхности;
- исключение механического разрушения обрабатываемого материала в результате пластической деформации;
- исключение образования микро и макротрещин, возникающих в результате растягивающих и сжимающих растяжений, а также возникающих под влиянием тепловых повреждений;
- минимизация окислительных и коррозионных процессов на обрабатываемой поверхности;
- уменьшение вариаций допусков, получаемых в процессе обработки.

3. Направление исследований по обеспечению общих характеристик процесса комбинированной электроалмазной обработки:

- увеличение эффективности операции шлифования, доказательно показав эффективность применения алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при шлифовании керамических, сверхтвёрдых, труднообрабатываемых материалов, а также современных инструментальных наноматериалов;

- минимизация негативного влияния адгезии и диффузии в зоне контакта;
- улучшение процесса отведения стружки из зоны резания;
- уменьшение температуры резания;
- уменьшение сил резания, потребления энергии и мощности шлифования;
- увеличение степени контроля над процессом шлифования.

Список литературы

1. ГОСТ 21445-84. Материалы и инструменты абразивные. Термины и определения.
2. Komanduri and C. Shaw. The Mechanism of Metal Build-up on Aluminum Oxide Abrasive // Annals of the CIRP (College International pour la Recherche en Productique), 1976. 25(1). P.191-196.
3. W. Konig and H. Lauer Schmaltz. Loading of the Grinding Wheel Phenomenon and Measurement // Annals of the CIRP (College International pour la Recherche en Productique), 1978. 27(1). P.217-220.
4. Гордон М.Б., Федяров В.И., Лосева Н.Р., Янюшкин А.С., и др. Непрерывная электрохимическая правка алмазных кругов на металлической связке // НИИАВТОПРОМ. Технология автомобилестроения. 1976. Вып. 4. С. 27-29.
5. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Архипов П.В., Попов В.Ю. Механизм образования защитных пленок на поверхности алмазных кругов с металлической связкой // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1 (5). С. 132-138.
6. Кудряшов С.М., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Использование минеральных рассолов для устранения засаленного слоя при комбинированной электроалмазной обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 6. С. 109-118.

7. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок: пат. 144708. Рос. Федерация. № 2014105641/02; заявл. 14.02.14; опубл. 27.08.14, Бюл. 24.

8. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с перпендикулярным расположением токопроводящих вставок: пат. 144707 Рос. Федерация. № 2014105640/02; заявл. 14.02.14; опубл. 27.08.14, Бюл. № 24.

9. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с параллельным расположением токопроводящих вставок: пат. 145108 Рос. Федерация. № 2014105639/02; заявл. 14.02.14; опубл. 10.09.14, Бюл. 25.

10. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Т. 4. № 1. С. 91-102.

11. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 799-800. С. 291-298.

12. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels // Eastern European Scientific Journal. 2014. № 2. С. 301-310.

13. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 5 (35). С. 14-19.

14. Попов В.Ю., Янющкин А.С., Медведева О.И., Скиба В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 68-74.
15. Янющкин А.С., Медведева О.И., Янющкин С.А., Попов В.Ю. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 183-190.
16. Попов В.Ю., Янющкин А.С. Исследование поверхности алмазных кругов после комбинированной электроалмазной обработки быстрорежущей стали // Технология машиностроения. 2013. № 11. С. 26-30.
17. Янющкин А.С., Попов В.Ю. Поверхность алмазного круга после электроалмазного шлифования быстрорежущей стали // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2002. Т. 2. С. 146-151.
18. Попов В.Ю., Янющкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаженного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114-120.

V.Y. Popov, A.S. Yanyushkin

TO THE QUESTION OF LOADING GRINDING WHEELS

Vyacheslav Y. Popov, Ph.D.
Bratsk State University, Faculty of Machine Building
40, Makarenko Street, 665709, Bratsk, Russia
E-mail: berkutoff@rambler.ru

Professor Alexander S. Yanyushkin, Ph.D, Dr.Sc.degree
Head of the Department of Machine Building Technology
Bratsk State University, Faculty of Machine Building
40, Makarenko Street, 665709, Bratsk, Russia
E-mail: yanyushkin@brstu.ru

Abrasive circle is the "heart" for the majority of grinding operations. From its state during the cutting process independent performance of future products. As a result of long-term and

comprehensive research scientists around the world, it was recognized that a major problem in achieving maximum effectiveness of grinding gets the usual process of brining circles. The existing methods of treatment, even when subjected to multiple energies at the same time not able to guarantee the active edit circles, without time and economic losses. Part science identified a variety of ways to minimize clogging, the authors are convinced that "the most important" cutting tool - diamond search, these methods are still not finished.

Keywords: loading, combined electric diamond grinding, diamond wheels, metal-bonded, adhesion contact.

УДК 621.9

Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин

МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ СВЯЗКЕ

Даниил Александрович Рычков, к.т.н., Братский государственный университет, Россия, Братск, e-mail: dielektrik84@mail.ru

D.A. Rychkov, Bratsk State University

Александр Сергеевич Янюшкин, д.т.н., Братский государственный университет, Россия, Братск, e-mail: yanyushkin@brstu.ru

A.S. Yanyushkin, Bratsk State University

Аннотация: представлены исследования мощности резания при обработке композиционных материалов на полимерной основе. Исследования проведены при фрезеровании стеклотекстолита СТЭФ-1 с инструментальным материалом марки ВКЗМ. Режимы резания варьировались в следующих пределах: скорость резания 45...48 м/с, подача 1,0...2,0 м/мин, глубина резания 0,5...1,5 мм. Результаты исследований показывают рост мощности резания с увеличением степени износа режущего инструмента и интенсификации режимов резания.

Abstract: studies presented cutting power when processing composite materials based on polymers. Studies conducted in milling fiberglass STEF-1 with instrumental VK3M grade material. Cutting conditions were varied within the following ranges: cutting speed 45...48 m/s, supply 1.0...2.0 m/min, a cutting depth of 0.5...1.5 mm. The research results show an increase in the cutting power with increasing wear of the cutting tool and the intensification of the cutting.

Ключевые слова: фрезерование, мощность резания, композиционный материал, твердые сплавы

Keywords: milling, cutting power, composite material, hard alloys

Механическая обработка композиционных материалов на полимерной основе связана с трудностями получения требуемого качества поверхностей и физико-механических свойств деталей [1, 2]. Это связано со специфической структурой полимерных композитов и их поведением при механическом воздействии. Одним из показателей процесса резания является мощность,

которая зависит от режимов резания и степени износа режущего инструмента.

Существующие исследования [3, 4] не дают однозначных рекомендаций по назначению параметров технологического процесса механической обработки композиционных материалов, но служат основой для проведения фундаментальных исследований с целью выявления рациональных режимов резания и конструктивных особенностей режущего инструмента.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Исследования мощности резания композитов проведены с использованием экспериментальной сборной фрезы, конструкция которой содержит корпус, который имеет посадочное отверстие и пазы, боковые поверхности которых выполнены под углом, для размещения вставок, имеющих напаянные режущие элементы с необходимым профилем резания. Особенность такой конструкции фрезы заключается в том, что она имеет угол заострения $\beta = 55^\circ$, передний угол $\gamma = 25^\circ$ и задний угол $\alpha = 10^\circ$ [5].

В качестве инструментального материала выбран вольфрамкобальтовый и твердый сплав марки ВК3М, поскольку он имеет достаточно высокую теплопроводность, прочность, теплостойкость и твердость, широко применяется в промышленности и рекомендуются для обработки высокопрочных композиционных материалов, [3, 4].

В качестве обрабатываемого материала выбран композиционный материал стеклотекстолит марки СТЭФ-1, поскольку он труднее поддается обработке резанием, а для его изготовления в производстве используется более мелкочаеистая стеклоткань. При этом стоимость СТЭФ-1 ниже, чем у аналогичных марок стеклотекстолита при тех же значениях прочностных характеристик [6 – 9].

Оборудование для проведения исследований выбрано с учетом рекомендаций по обработке композиционных материалов: необходимо обеспечить максимально возможную скорость резания с минимальной

подачей и глубиной резания [9]. Этим требованиям удовлетворяет заточной станок модели 3Д642Е, позволяющий устанавливать число оборотов шпинделя до 6000 об/мин. Для обработки композиционных материалов станок оснащен системой местной вентиляции и приспособлениями для крепления заготовки и инструмента.

Выбор величины подачи на зуб S_z и глубины резания t , а также остальных режимов обработки основан на существующих рекомендациях по обработке специальных материалов в машиностроении [3, 4] и результатах предварительных исследований. Согласно рекомендациям наилучшее качество поверхности при фрезеровании полимерного композиционного материала ДСтП марки П1 достигается при следующих режимах: $V = 45 \dots 48$ м/с, $S_0 = 4$ м/мин, $t = 1$ мм. С учетом того, что СТЭФ-1 имеет более высокую прочность, чем ДСтП-П1, режимы обработки были скорректированы, а их варьирование осуществлялось в следующих пределах: скорость резания $V = 45 \dots 48$ м/с, $S_0 = 1,0 \dots 2,0$ м/мин (при количестве рабочих зубьев фрезы $z = 1$ при данной скорости получим подачу на зуб $S_z = 0,167 \dots 0,33$ мм/зуб); глубина резания $t = 0,5 \dots 1,5$ мм.

Мощность резания при фрезеровании стеклотекстолита фиксировалась в процессе обработки композиционных материалов на измерительном приборе К506 через определенные промежутки времени. В зависимости от роста фаски износа h_z по задней поверхности с 0,01 до 0,35 мм мощность увеличилась на 0,15...0,18 кВт (рис. 1, 2), что свидетельствует о возрастании сил резания. Это объясняется тем, что при образовании фаски износа по задней поверхности, связанной с износом режущего инструмента, возникает сила трения, препятствующая срезанию заданного слоя. С течением времени обработки величина износа увеличивается и вызывает дополнительные затраты энергии для преодоления трения. На рис. 1 показана зависимость мощности резания от времени обработки, из которой можно выделить три основные стадии: период приработки режущего инструмента, период равномерного износа и период катастрофического износа.

С увеличением подачи и глубины резания, мощность растет в связи с увеличением толщины срезаемого слоя обрабатываемого материала и нагрузки на режущий инструмент. Графики зависимости мощности от подачи и глубины резания представлены на рис. 3 и 4.

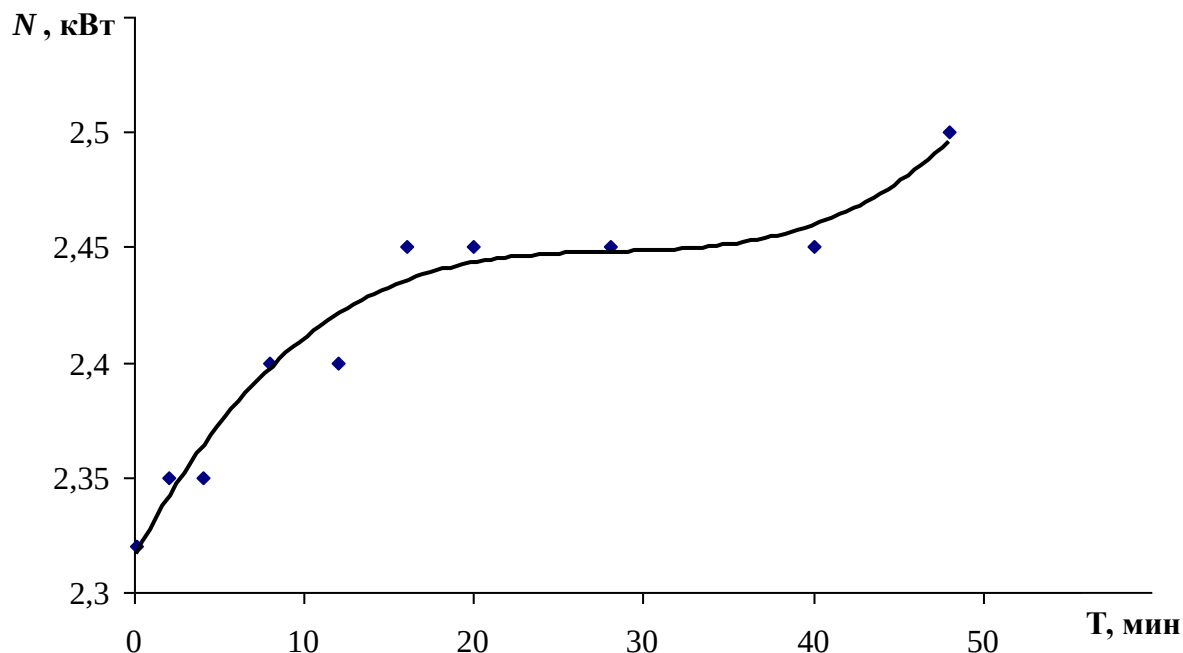


Рис. 1. Зависимость мощности резания от времени обработки

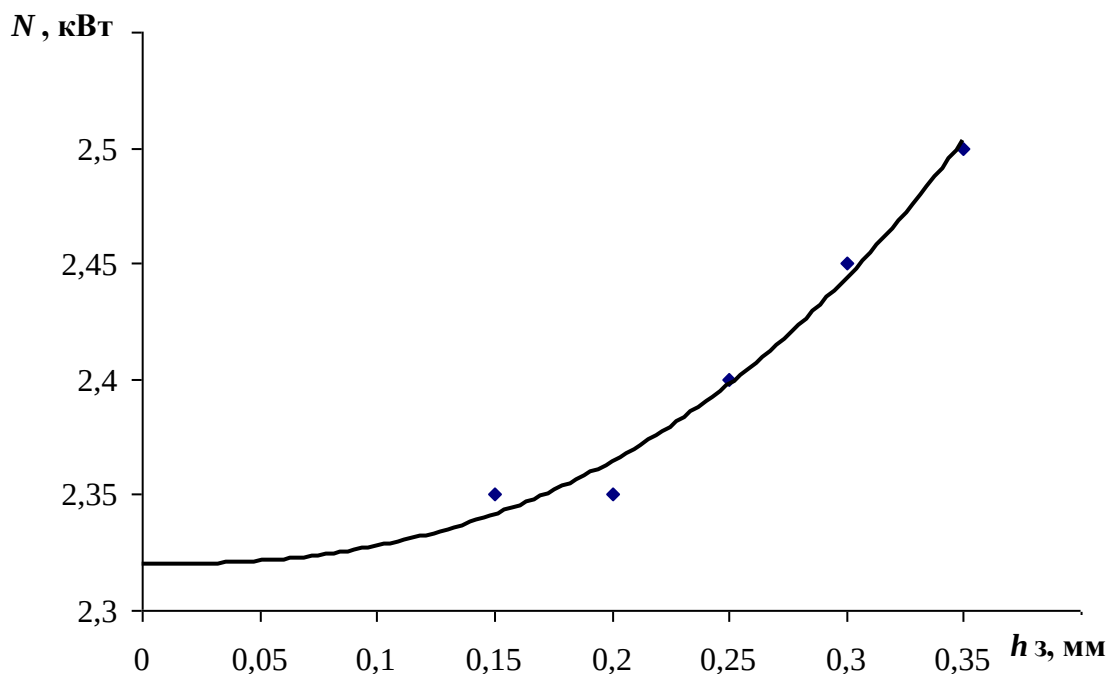


Рис. 2. Зависимость мощности резания от величины фаски износа по задней поверхности инструмента при $S_z = 0,167$ мм/зуб и $t = 0,5$ мм

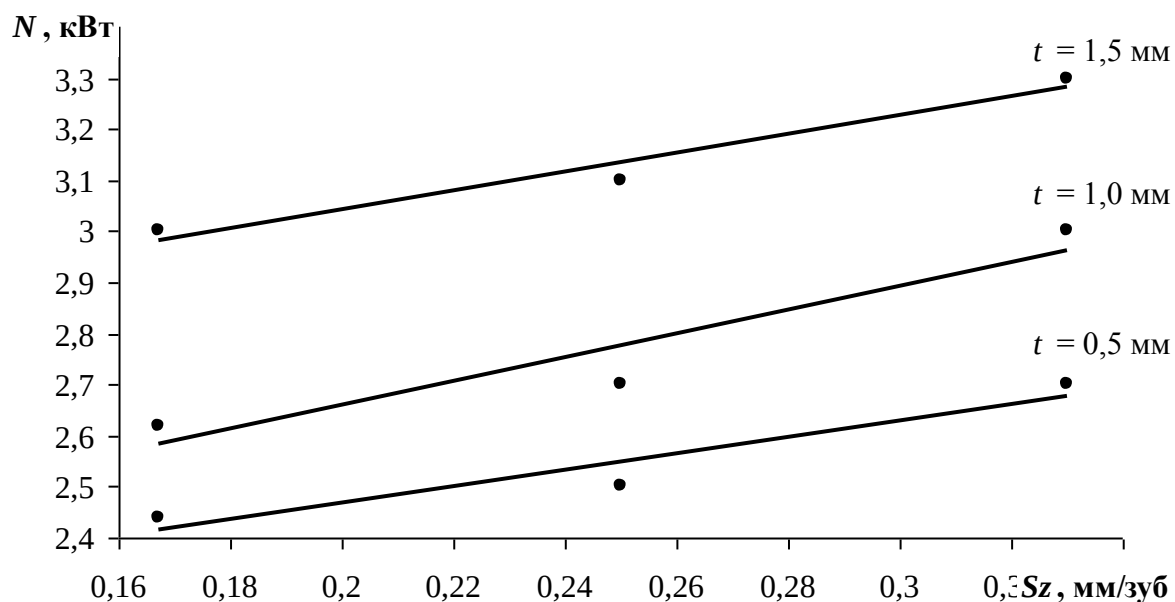


Рис. 3. Зависимость мощности резания от подачи на зуб инструмента при величине фаски износа, равной 0,35 мм

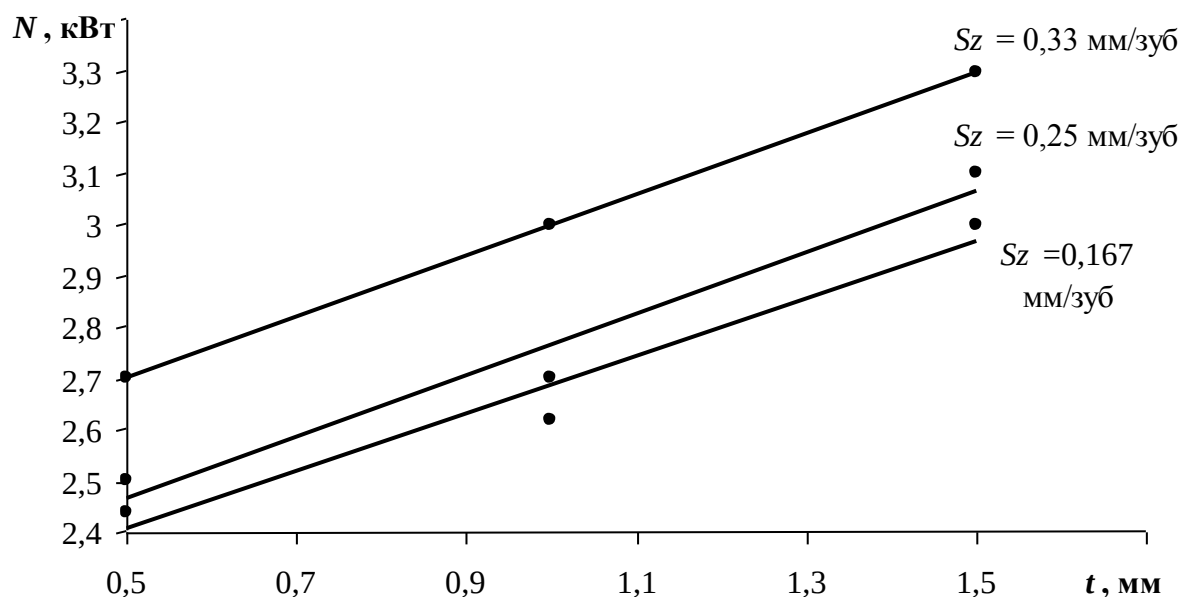


Рис. 4. Зависимость мощности резания от глубины резания при величине фаски износа, равной 0,35 мм

Таким образом, при обработке композиционных стеклотекстолитовых материалов необходимо назначать минимальную подачу и глубину резания, несмотря на потерю производительности обработки, а также применять инструментальные материалы, прочность которых должна быть достаточно высока для обеспечения нормальной работоспособности режущего

инструмента. Для рациональных показателей мощности рекомендуется не превышать критерий износа по задней поверхности 0,25 мм.

Литература

1. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Качество поверхности композиционного материала стеклотекстолит после фрезерования // Инновационные технологии и экономика в машиностроении. Т. 1. 2014. С. 343 – 347.
2. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V., Surface quality of the fiberglass composite material after milling, Applied mechanics and materials. 2014. № 682. P. 183 – 187.
3. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
4. Кузнецов А.М. Повышение эффективности фрезерования композиционных древесных материалов мелкозернистым твёрдосплавным инструментом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2009. 20 с.
5. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6 – 13.
6. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Базаркина В.В. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолоконистых композиционных материалов на полимерной основе // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 3. С. 150 – 153.
7. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 91-94.
8. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146 – 149.
9. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Ткаченко Е.В., Ткаченко Н.А. Особенности фрезерования полимерных композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2 (18). С. 88-90.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Вячеслав Викторович Максаров, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский
горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург,
e-mail: maks78.54@mail.ru, тел. 8 (921) 759 35 04.

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы качества обрабатываемых поверхностей режущим инструментом, оснащенным сменными пластинами из оксидно-карбидной керамики, за счет определения пористости керамического инструментального материала, влияющей на его режущие свойства. Устанавливается корреляционная зависимость пористости керамического материала инструмента от удельного электрического сопротивления сменных керамических пластин. На основе установленной корреляционной зависимости производится выбор керамических пластин для требуемых условий механической обработки резанием.

Ключевые слова. Пористость оксидно-карбидной керамики, качество обрабатываемой поверхности, удельное электрическое сопротивление.

В настоящее время в промышленном производстве все более широкое применение находит керамический режущий инструмент, который применяется для чистовой обработки точных элементов деталей машин. Имеется достаточно большое количество керамических материалов, применяемых в качестве инструментальных. В данной работе внимание акцентируется на оксидно-карбидной керамике – материале, которой достаточно широко применяется на предприятиях машиностроительного комплекса и поэтому может служить отправной точкой для исследования работоспособности прочих режущих керамических материалов.

На работоспособность керамического инструмента, зависящую, прежде всего от прочности, помимо прочих факторов, большое влияние оказывает пористость керамического материала. Известно, что чем меньше пористость

инструментального материала, тем лучше режущие свойства и работоспособность инструмента, полученного при помощи порошковой металлургии. Причем данный фактор практически не зависит от того, каким из методов был получен инструментальный материал – горячим прессованием, спеканием и т.п. – процент пористости материала можно уменьшить, но полностью избавиться от пор пока так и не удалось. Это в полной мере относится ко всем инструментам, изготовленным из керамики, вне зависимости от ее компонентов и структурного состава.

Таким образом, одним из решений проблемы прогнозирования работоспособности керамического инструмента является определение функциональной зависимости режущих свойств керамики, например, прочности, от пористости материала.

Любой керамический материал, в том числе и режущая оксидно-карбидная керамика – это, как правило, сочетание твердого вещества с пустотами (порами). Объем пор, их характер распределения и размеры оказывает значительное влияние на ряд свойств керамических изделий и материалов. Так, например, прочность керамики зависит не только от общей пористости, но и от размера пор и равномерности их распределения по площади исследуемой поверхности.

С увеличением пористости прочность керамики уменьшается за счет увеличения дефектности структуры и снижения прочности связей. Поры в керамике имеют разнообразную форму, очертания, неравномерно распределены по объему, поэтому полную характеристику пористости получить чрезвычайно трудно. Несмотря на разнообразие форм, поры можно подразделить на закрытые поры (недоступные для проникновения в них жидкости и газа) и открытые, которые в свою очередь делятся на тупиковые (заполняемые жидкостью и газом, но не влияющие на проницаемость керамики) и каналобразующие (открытые с обоих концов поры, создающие поровые каналы).

Существует несколько основных подходов к измерению пористости и анализу структуры поверхности исследуемого материала. Основными из них являются метод газовой адсорбции (физической и химической), метод ртутной проникающей порозиметрии, газодинамический метод и др. Каждый из этих методов показывает максимальную эффективность при измерении пористости материала в строго определенном диапазоне. Поэтому выбор способа анализа очень сильно зависит от предполагаемой структуры материала, а также от типа и формы пор.

Поскольку прямые методы измерения пористости материалов чрезвычайно сложны, оборудование для измерения достаточно дорого, то в технологии керамики этот показатель часто оценивают путем определения других свойств, непосредственно зависящих от пористости. В качестве такого метода предлагается оценка пористости материала по корреляционной зависимости от величины удельного электрического сопротивления пластин из режущей керамики.

В начале исследований, проводимых для определения прочности оксидно-карбидной керамики, необходимо было выполнить металлографические исследования, которые бы позволили выявить структурный состав керамики, определить наличие пор и их количество.

Полученные при металлографических исследованиях данные (рис. 1) позволили установить, что современные марки оксидно-карбидной керамики типа ВОК6З содержат Al_2O_3 - 75% + (Ti, W, Mo)C - 25% . Для подтверждения степени пористости структура режущей керамики исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии. Фотографии передней поверхности режущей керамической пластины представлены на рис. 3. Как видно из данного изображения, у исследуемого образца имеются поры различного размера и структуры. Известно, что более пористая керамика имеет больший размер зерен (порядка 3...4 мкм) по сравнению с обычной (без пор) керамикой (порядка 1...2 мкм).

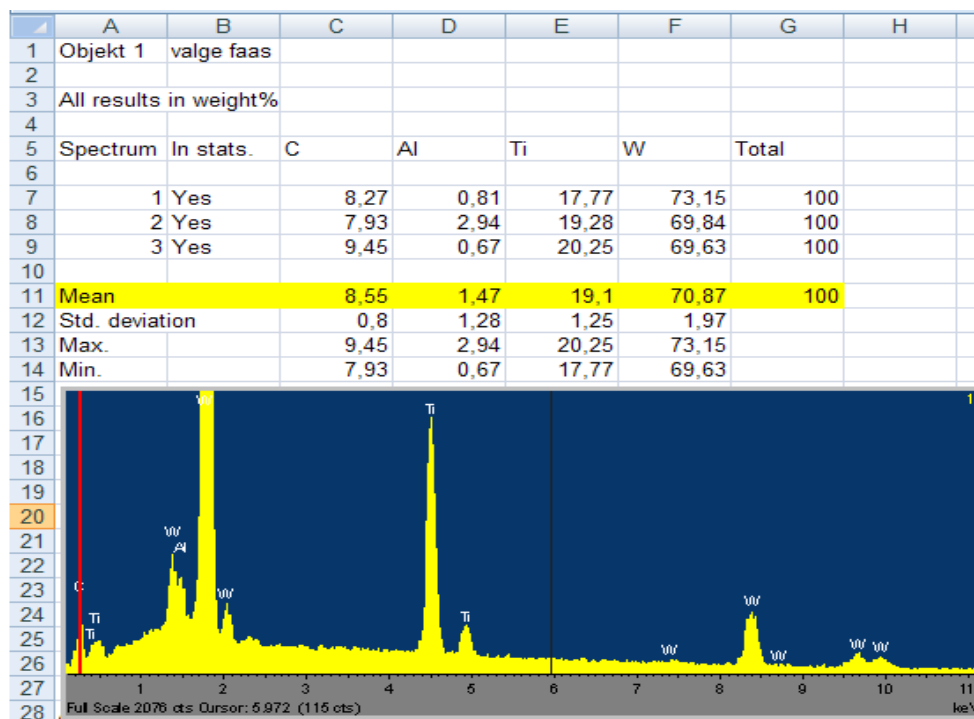


Рис. 1. Процентное соотношение фаз оксидно-карбидной керамики



Рис. 3. Поры оксидно-карбидной керамики

В обычных условиях для определения количества пор, размер которых составляет 0,1...10 нм, используются методы, применение которых в производственных условиях затруднено. Пористость керамики можно оценить только при помощи электронного микроскопа, а саму керамическую

пластину для исследования следует особым образом тщательно подготовить, что занимает длительное время.

Качество обрабатываемой поверхности определяется структурными составляющими оксидно-карбидной керамики и пористостью, которая определяется удельным электрическим сопротивлением и соответственно оптимальными рабочими характеристиками применяемого инструмента. Зная эти характеристики, исходя из определенного запаса точности материала, можно рассчитать оптимальные параметры режимов обработки и, соответственно, прогнозировать качество обработанной поверхности.

Выводы. 1. Установлено, что оксидно-карбидная керамика обладает определенным электрическим сопротивлением, ее структуру характеризуют следующие параметры: количество зерен, средний диаметр зерен карбидов Ti, W, Mo, суммарная линия протяженности границ карбидных зерен и пористость. Экспериментально доказано, что образцам с относительно малым электрическим сопротивлением ($R \approx 10 \text{ Ом}$) присущи больший диаметр зерна, больший процент пористости, малое значение суммарной линии протяженности границ зерен, малое количество зерен.

2. Качество обрабатываемой поверхности определяется структурными составляющими оксидно-карбидной керамики и пористостью, которая определяется удельным электрическим сопротивлением и соответственно оптимальными рабочими характеристиками применяемого инструмента.

Автоматическая ротационная сборка цилиндрических соединений**Марк Григорьевич Кристаль**, д-р техн. наукВолгоградский государственный технический университет, г. Волгоград,
Россия, e-mail: crysmar@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены конструкция и принцип действия ротационного сборочного устройства. Приведена методика проведения экспериментального исследования влияния предварительного угла перекоса сопрягаемых поверхностей, динамических характеристик охватываемой детали на быстродействие сборочного процесса и на величину предельной угловой скорости вращения деталей и время протекания процесса сборки прецизионных цилиндрических соединений.

Ключевые слова: ротационная сборка, угол перекоса сопрягаемых поверхностей, угловая скорость вращения, гироскопический момент, радиус инерции.

При автоматической сборке сопрягаемые цилиндрические детали на сборочной позиции располагают под некоторым углом друг к другу. Это вызвано либо погрешностью их взаимного расположения, либо, при использовании эффекта наклона осей сопрягаемых деталей, служащего для компенсации этой погрешности. Придерживаясь принципа свободного взаимодействия деталей на сборочной позиции, следует создать некоторые дополнительные условия, обеспечивающие совмещение сопрягаемых поверхностей [1, 2]. Поскольку охватываемая деталь (валик) расположена наклонно в поле сил тяжести, то для ее подъема и поворота вокруг некоторой оси требуется подведение дополнительной энергии.

За счет придания деталям 1 и 2 совместного вращения с угловой скоростью $\omega = \dot{\gamma}$ (γ – угол прецессии) вокруг оси Oz_1 (оси прецессии) в механическую систему добавляется дополнительная энергия (рис. 1). Это приводит к возникновению гироскопического момента L_T , действующего в плоскости расположения векторов $\vec{\omega}$ и $\vec{\omega}_z$. Он поворачивает деталь 2 вокруг неподвижной точки O .

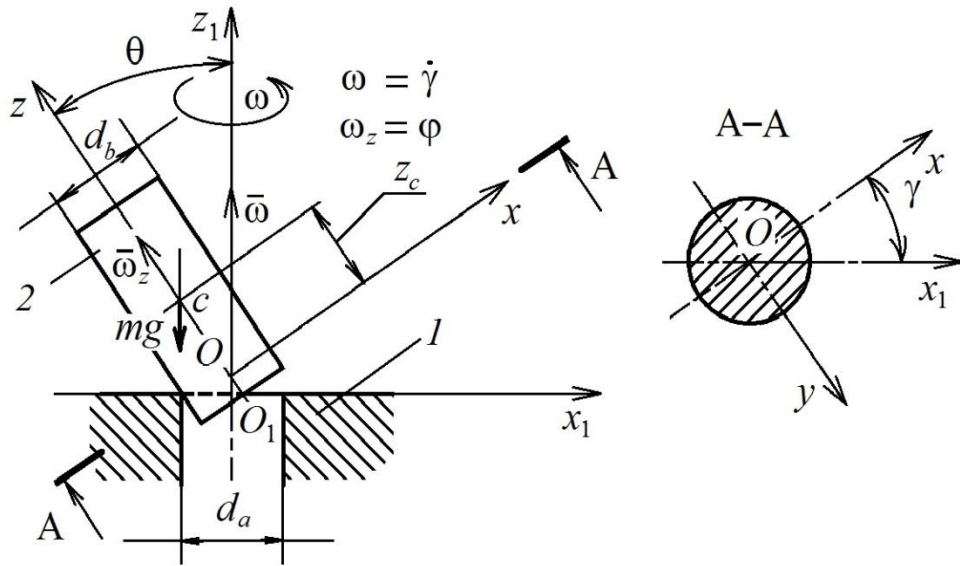


Рис. 1. Относительное расположение сопрягаемых деталей в подвижной и неподвижной системах координат

С использованием динамических уравнений Эйлера движения охватываемой детали 2 в проекциях на подвижные оси координат $Oxyz$, скрепленные с ней, была вычислена величина этого момента:

$$L_T = J_x \omega_z \omega \sin \theta \left(1 + \frac{J_x - J_z}{J_x} \frac{\omega}{\omega_z} \cos \theta \right),$$

где $J_x = J_x^0 + m r_c^2$ – момент инерции детали 2 относительно точки поворота, J_x^0 – центральный момент инерции детали 2 относительно оси Ox подвижной системы координат; m – масса детали 2; r_c – модуль радиус-вектора $\vec{r}_c$ движения центра масс детали 2 вокруг приведенной точки поворота; $r_c = l_c - l^*$, $l^* = \frac{d_a^{\min} - d_b^{\max} \cos \theta}{2 \sin \theta}$ – уравнения связи, согласно рис.1;

J_z – момент инерции валика относительно оси собственного вращения; $\omega_z = \dot{\phi}$ – проекция угловой скорости $\bar{\omega}$ на ось Oz ; θ – угол нутации.

$$\text{Так как } \omega_z = \omega \cos \theta, \text{ то: } L_T = J_x \omega^2 \cos \theta \sin \theta \left(1 + \frac{J_x - J_z}{J_x} \right).$$

Движение гироскопа является устойчивым при собственном вращении его вокруг большой или малой осей эллипсоида инерции, а вращение вокруг

средней оси этого эллипсоида неустойчиво. Поэтому, если начальный угол θ_0 нутации (он же начальный угол относительного расположения осей сопрягаемых поверхностей) будет меньше некоторого угла $\theta_{кр}^*$ между средней и большой осью эллипсоида инерции, то при достижении некоторого значения угловой скорости $\omega = \omega_{кр}$ охватываемая деталь начнет поворот (в соответствии с правилом Жуковского) до совмещения осей сопрягаемых деталей.

$$\text{Угол } \theta_{кр}^* \text{ вычисляем как: } \theta_{кр}^*(\varepsilon) \leq \arctg[\varepsilon \sqrt{\frac{3\varepsilon^{-1} - \varepsilon - 2}{2 + \varepsilon^{-1} - 3\varepsilon}}], \text{ где } \varepsilon = \sqrt{\frac{J_x}{J_z}}.$$

С другой стороны угол $\theta_{кр}$ ограничен условием относительного расположения сопрягаемых поверхностей под углом между осями. Его величину определяют как:

$$\theta_{кр}(v) = \arccos(v / (\sqrt{1 - v^2} + 1)),$$

где $v = d_b^{\max} / d_a^{\min}$; $d_b^{\max}$ – наибольший диаметр охватываемой поверхности; $d_a^{\min}$ – наименьший диаметр охватывающей поверхностей.

Движение, описанное выше, начинается после того, как величина гироскопического момента превысит величину момента сил трения:

$$J_x \omega^2 \cos \theta \sin \theta (1 + \frac{J_x - J_z}{J_x})(1 - f) \geq mgf |\bar{r}_c| \cos \theta.$$

где f – коэффициент трения скольжения материалов сопрягаемых деталей.

Тогда величину $\omega_{кр}$ критической угловой скорости, при которой начинается поворот охватываемой детали к совмещению осей сопрягаемых поверхностей, можно вычислить по выражению:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{mgf^* |\bar{r}_c|}{(2J_x - J_z)(1 - f^*) \sin \theta_0}},$$

где $\theta_0 < \theta_{кр}$ – допустимый угол наклона осей сопрягаемых деталей,

который выбирается меньшим из $\theta_{кр}^*$ и $\theta_{кр}$; f^* – приведенный коэффициент трения.

При достижении двухточечного контакта полученные выражения сохраняют свой вид. Вычисление заканчивается к моменту времени t_2 , при достижении углом θ значений, близких к $\theta = \arctg[(d_a^{\min} - d_b^{\max})/l_c]$.

Для проверки физической реализации предложенного способа ротационной сборки была разработана опытная установка [3]. Она (рис.2) состоит из корпуса 1, который установлен на амортизаторах 2. Сборочный столик 3 закреплен на валу 4, с размещенными на нем пневматическими турбинами разгона 5 и торможения 6, вращающимся в опорах вращения 7 с подшипниками 8, которые установлены на упругих пружинных подвесах 9 относительно корпуса 1. Сжатый воздух подается через штуцера 10 и 11, закрепленные на корпусе 1, что обеспечивает либо разгон, либо торможение вала турбины. На сборочном столике 3 выполнены базирующие поверхности под охватывающую деталь 12 (рис. 3.). Для определения частоты вращения вала, при котором будет наблюдаться сопряжение охватывающей детали 12 и охватываемой детали 13, к сборочному столику прикреплен диск 14 с прорезью, при вращении которого фотодатчик 15 посылает через микроконтроллер сигнал значения частоты вращения на ЖК-дисплей.

Перед началом испытаний был произведен расчет моментов инерции J_{xc}, J_{yc}, J_{zc} детали 13. Далее в сборочном столике 3 устанавливали охватывающую деталь 12, которая имеет только одну степень подвижности – вращение вокруг своей оси. В ее отверстие под определенным начальным углом θ_0 наклона осей сопрягаемых поверхностей помещалась деталь 13. Затем подключалось питание сжатым воздухом турбины 6 вала привода установки. Одновременно включался измеритель угловой скорости вращения (фотодатчик, контроллер, ЖК-дисплей) ротора установки. Измерение времени t процесса сборки

производилось по секундомеру.

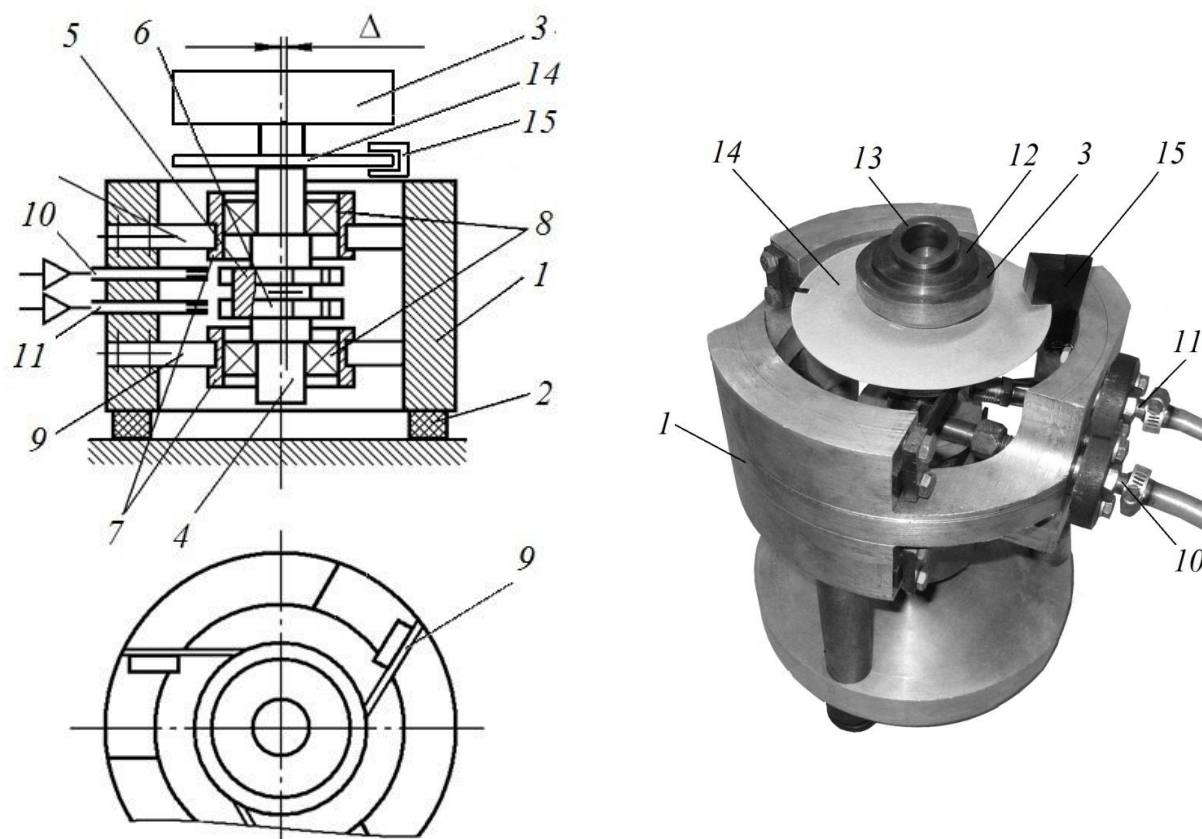


Рис. 2. Опытная установка

Регулятором давления сжатого воздуха изменялась частота ω вращения ротора, до тех пор, пока не будет наблюдаться сопряжение деталей. По результатам опытов были получены зависимости влияния моментов инерции на число $n = f(J)$ оборотов в момент сборки и время $t = f(J)$ процесса сборки.

Список литературы

1. Кристаль М.Г., Чувилин И.А. Исследование динамики вибрационного сопряжения с нижней опорой торца охватываемой детали // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2008. - № 4. - С. 13-17.
2. Кристаль М.Г., Чувилин И.А. Модель динамики ротационной сборки цилиндрических деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2008. - № 8. - С. 12-15.

3. Чернявский, С.Н., Кристаль М.Г. Устройство для ротационной сборки роликовых подшипников // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2012. - № 4. - С. 22-24.

M. G. Kristal, Dr. Sci.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia,

e-mail: crysmar@mail.ru

Automatic rotary assembly of cylindrical connections

Abstract. *Construction and operating principle of the rotary assembly device have been considered. Laboratory study technique has been describe to define influence mating surfaces' preliminary skew angle and male part's dynamic characteristics on the performance of the assembly process and the value of the extreme angular velocity of rotation of parts and time course of the assembly process precision cylindrical connection.*

Keywords: rotary assembly, the skew angle of mating surfaces, the angular velocity of rotation, gyroscopic moment, the radius of gyration.

УДК 621

Т. Д. Кожина

Научные технологии в авиадвигателестроении

Татьяна Дмитриевна Кожина, доктор технических наук, профессор,
проректор по науке и инновациям РГАТУ имени П.А. Соловьева, Россия
Рыбинск. E-mail: prorectnir@rsatu.ru

В статье представлены основные результаты инновационной деятельности Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьева в области авиадвигателестроения, и других технических областях с применением современных наукоемких технологий.

Ключевые слова: Авиадвигателестроение, наукоемкие технологии, инновации, газотурбинный двигатель.

В настоящее время доля импорта в себестоимости отечественного авиационного двигателестроения достаточно высока. В связи с этим развитие импортозамещения и экспорта отечественных ГТД становится особенно актуальным, поскольку именно они позволят избежать напряженности, возникающей вследствие необходимости использования при изготовлении промышленной продукции импортных изделий, компонентов и услуг. Важнейшим условием, определяющим целесообразность импортозамещения, является возможность обеспечения необходимого инновационного уровня отечественных производств авиационных двигателей и признание их конкурентоспособности на внешних рынках. Модернизация существующих производств ГТД, прежде всего производство наиболее применяемых деталей, входящих в состав современных авиационных двигателей, позволяет обеспечить конкурентоспособность выпускаемых в РФ ГТД [1,2].

РГАТУ имени П. А. Соловьева является базовым вузом инновационного территориального кластера «Газотурбостроение и энергомашиностроение», созданного при поддержке региональных и муниципальных органов власти в рамках реализации программы развития Ярославской области. НПО «Сатурн» является организацией-координатором этого кластера. В указанный выше кластер так же входят производственные, научные и образовательные организации авиастроительной отрасли: «ОДК - Газовые турбины», г. Рыбинск; СП «Волгаэро», г. Рыбинск, РФ-Франция; СП «РеМО», г. Рыбинск, Чехия – РФ; ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва; ВИАМ, г. Москва; МАИ, г. Москва и др.

Одним из ключевых моментов реализации РГАТУ инновационных проектов является его взаимодействие не с одним предприятием, а с группой предприятий в рамках инновационного территориального кластера «Газотурбостроение и энергомашиностроение». Участниками кластера являются как предприятия региона, так и зарубежные компании работающие в сфере авиадвигателестроения: «НПО «Сатурн», «Сатурн - Газовые турбины», «СатИЗ», СП «Волгаэро» (Франция - РФ), СП «РеМО» (Чехия -

РФ). Такой союз позволяет гарантированно обеспечивать спрос результатов научной деятельности вуза предприятиями, осуществляющими модернизацию производства, освоение новых видов продукции и поставку ее за рубеж.

Основные направления реализуемых технологий и выпускаемой продукции (специализация кластера) – полный цикл создания новых газотурбинных двигателей и энергетических установок от проектирования и проведения инженерных расчетов до изготовления опытных образцов и испытаний; комплексные информационные технологии на всех этапах жизненного цикла изделия; развитие испытательной базы, обеспечивающей полный спектр инженерных и сертификационных испытаний по стандартам АрМАК и EASA.

Программа развития кластера нацелена на развитие научно-производственного потенциала предприятий – участников кластера и формирование в Рыбинске инфраструктуры, способствующей развитию высокотехнологичного, инновационного малого и среднего предпринимательства.

В рамках кластера РГАТУ выступает инициатором сотрудничества и генератором инновационных проектов, реализуемых вузом по заказу промышленных предприятий:

1. Определение механических характеристик сталей с целью подбора российских сталей для крупных отливок в рамках выполнения предприятием «Коматсу» (г. Ярославль) программы «Локализации производства» (рис. 1).

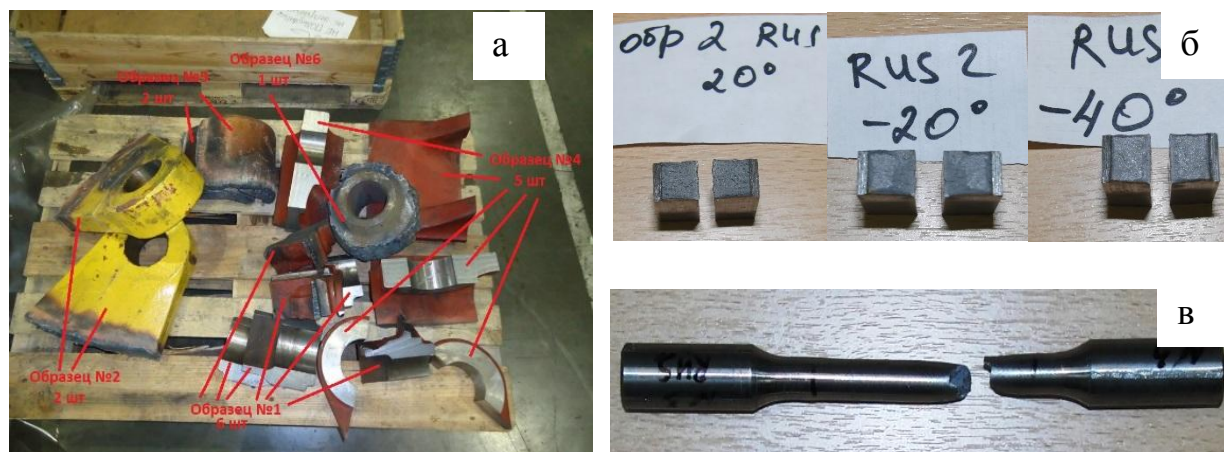


Рис. 1. Образцы для испытаний:

а – образцы деталей; б – образцы для исследования структуры и фазового состава сплавов;
в – образец для определения механических свойств.

2. Теоретическое и экспериментальное моделирование газодинамических процессов авиационных ГТД, оптимизация аэродинамических поверхностей проточной части турбин, повышение эффективности двигателей (Минобрнауки) (рис. 2).

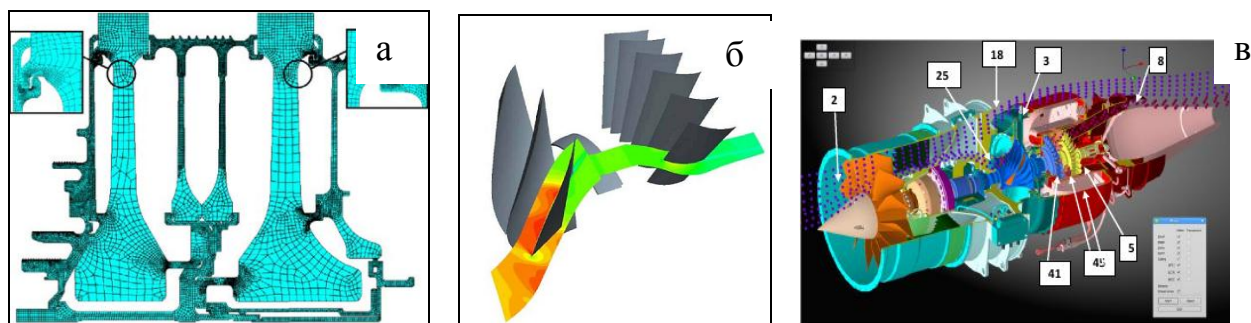


Рис. 2. Моделирование рабочих процессов авиационных ГТД:

а – создание конечно-элементных моделей; б – выполнение газодинамических, тепловых и прочностных расчетов; в – виртуальные испытания ГТД

3. Проведение научных исследований и выполнение заказов на испытания образцов (рис. 3).



Рис. 3. Компьютеризированный стенд для испытаний на прочность:

а – универсальная испытательная машина LABTEST 6.125H.50; б – рабочая зона испытательной машины с нагревателем.

4. Разработка и опытное исследование характеристик генератора макродисперсного капельного потока для имитации дождя» (заказчик НПО «Сатурн») (рис.4).



Рис. 4. Опытный образец форсунки генератора капельного потока

5. Расчетно-экспериментальная отработка элементов опытной камеры сгорания (заказчик НПО «Сатурн») (рис.5)

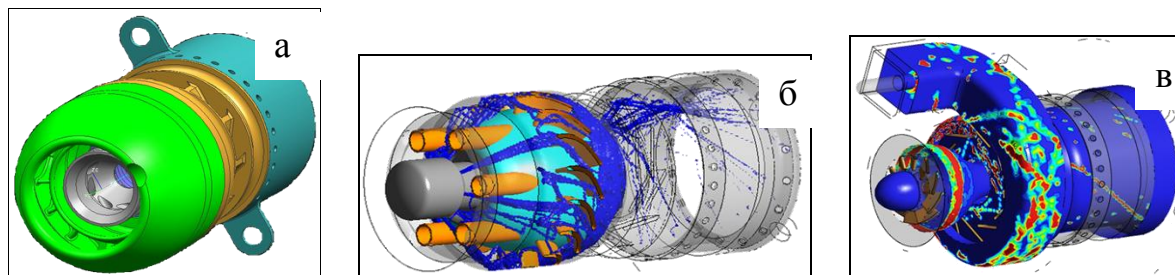


Рис. 5. Расчетно-экспериментальные работы:

а – модели фронтных устройств; б – расчетные сетки multiblock structuring; в – распределение капель топлива на стенках горелочных модулей.

РГАТУ имени П. А. Соловьева совместно с промышленными предприятиями региона: «НПО «Сатурн», «Рыбинский завод приборостроения», «КБ «Луч» является участником трех технологических платформ: «Национальная космическая технологическая платформа», «Авиационная мобильность и авиационные технологии», «Национальная суперкомпьютерная технологическая платформа». В настоящее время вуз ведет активную разработку проектов по данным приоритетным направлениям.

По проектам технологической платформы «Авиационная мобильность и авиационные технологии» осуществляются исследования и разработки в областях: новых промышленных технологий проектирования и изготовления моноколес, монолитных направляющих аппаратов и лопаток компрессоров низкого и высокого давления облегченной конструкции; технологий проектирования и изготовления методик расчета термогазодинамических, конструктивных и тепловых характеристик высокоэффективных горелочных модулей и камер сгорания; технологий нанесения защитных жаростойких газонепроницаемых покрытий на детали авиационных и ракетных двигателей; промышленной технологии сборки, высокоточной балансировки и экспериментальной доводки малоступенчатых компрессоров высокого давления перспективных энергоустановок для летательных аппаратов нового поколения; бесплатформенной инерциально-магнитометрической

адаптивной навигационной системы для беспилотных летательных аппаратов; комплексной системы подготовки и переподготовки специалистов технического профиля для предприятий авиастроительной отрасли на основе интеграции НПО, СПО, ВПО и ДПО и т.д.

По проектам «Национальной космической технологической платформы» осуществляются исследования и разработки в областях: технологии аэродинамических исследований и испытаний аэродинамических платформ для БЛА средней дальности с целью подтверждения летно-технических, аэродинамических и прочностных характеристик воздушной платформы, а также характеристик системы управления и силовой установки; бесплатформенной инерциально-магнитометрической адаптивной навигационной системы; технологий выращивания монокристаллов лейкосапфира и других тугоплавких монокристаллов для оптики и нанoeлектроники и т.д.

По проектам «Национальной суперкомпьютерной технологической платформы» в областях: исследований возможности применения расчетных пакетов математического моделирования с открытым исходным кодом для решения задач инженерного анализа при проектировании авиационных двигателей; разработке оптимизирующего JIT-компилятора для MSIL-кода под GPU- вычислители архитектуры Nvidia и ATI.

Конкурентоспособность РГАТУ имени П.А. Соловьева определяется неразрывной связью с научно-производственным объединением «Сатурн», ведущим разработку газотурбинной техники нового поколения для авиации, энергетики и морского флота.

Основная сфера совместной научной деятельности РГАТУ имени П.А. Соловьева и НПО «Сатурн» заключается в подготовке и создании автоматизированного производства деталей перспективных ГТД для авиации и энергетики. В этом направлении выполнены следующие НИОКР: «Разработка программного обеспечения (ПО) «Автоматизированная система «Рационализация» в среде «Unify»; «Автоматизированная система

оформления и учета заявок»; «Разработка и подготовка к изданию пяти справочников для SaM-146»; «Камера – ПИ – РГАТУ» (Камера сгорания перспективного ГТД нового поколения; Турбина-ПИ – РГАТУ (Турбина перспективного ГТД нового поколения) и ряд других.

Вуз имеет опыт работы в рамках Постановления Правительства РФ №218. НПО «Сатурн» и РГАТУ имени П.А. Соловьева реализовали комплексный проект по «Созданию высокотехнологичного производства лопаток малоступенчатых высоконапорных компрессоров газотурбинных установок – центра компетенций ОДК».

В основу этого проекта легли разработки ученых РГАТУ в области расчета и конструирования компрессоров ГТД нового поколения, создания автоматизированных технологий производства деталей ГТД, внедрения систем автоматизированной подготовки производства, совершенствования процессов заготовительного производства, в том числе перехода на заготовки без припуска под механическую обработку. Эти научные достижения наиболее востребованы производством, поскольку позволяют не только повысить эксплуатационные показатели вновь создаваемых двигателей за счет внедрения патентованных разработок и ноу-хау, но и повысить качество изделий и снизить трудоемкость их изготовления, за счет автоматизации производства и соответственно уменьшения влияния человеческого фактора [3].

Проведенные в рамках данного проекта НИОКР посвящены наиболее ответственным и нагруженным деталям ГТД – лопаткам (рис. 6), определяющим ресурс и надежность его работы.

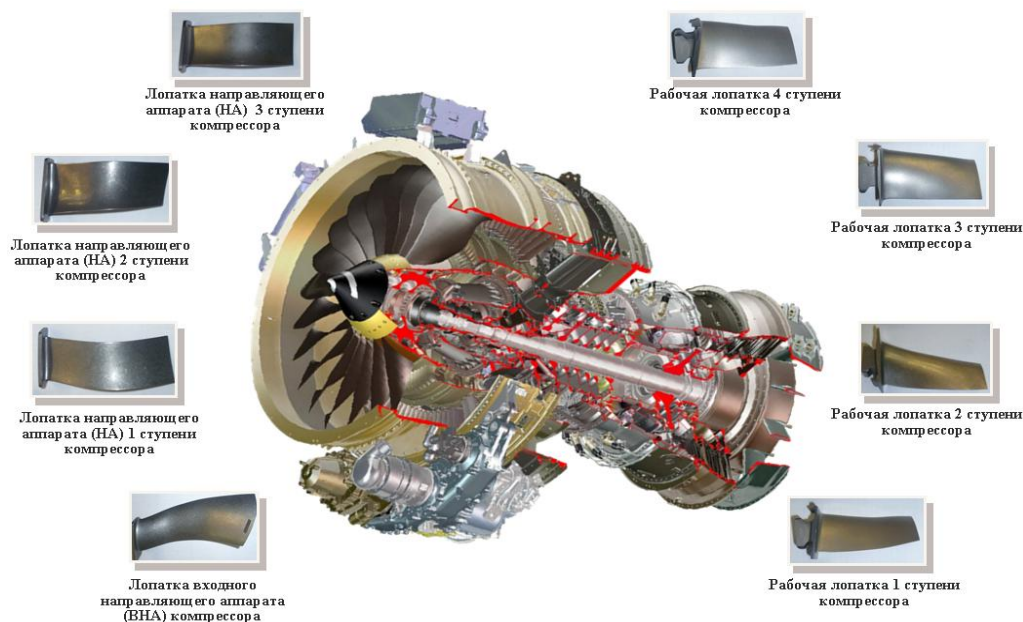


Рис. 6. Лопатки компрессора двигателя Sam146

С целью изготовления ГТД нового поколения для современных гражданских и военных самолетов, а также судов и энергетических установок в рамках проекта выполнена разработка производственной системы на базе технологических процессов ЭХО нового уровня, создание технологического оборудования для его осуществления и выполняется комплексное обеспечение работы этого оборудования [4].

Для реализации вновь разработанных технологий спроектирован и изготовлен специальный многофункциональный обрабатывающий центр для комплексной обработки наружного контура лопаток компрессора в автоматическом цикле (рис. 7). Новые технологические решения состоят в реализации в технологического комплекса традиционного и высокоскоростного глубинного шлифования и совмещённой обработки твёрдосплавными фрезами прикомлевых участков.

Данное оборудование предназначено для осуществления технологии высокоскоростного глубинного шлифования титановых сплавов с функцией адаптивного фрезерования прикомлевого участка лопаток газотурбинных двигателей залитых в брикет. Обработка включает получение методом высокоскоростного глубинного шлифования размеров хвостовика и полки

лопатки, а также доработки методом адаптивного фрезерования прикомлевого участка лопатки за одну установку.



Рис. 7. Специальный многофункциональный обрабатывающий центр

Внедрение результатов проекта на практике, в том числе реализация мероприятий по совершенствованию процессов ЭХО лопаток и модернизации оборудования для осуществления данного процесса позволило обеспечить потребности в широкой номенклатуре лопаток компрессора основные предприятия ОДК для выполнения программы по изготовлению перспективных авиационных двигателей для гражданской авиации.

В результате проекта изменилась структура существующего производства деталей ГТД на «НПО Сатурн» в части организации производственной линии для изготовления рабочих лопаток компрессора по первому классу точности ОСТ 1.02571-86, включающей производственный участок и вспомогательные помещения для подготовки, хранения и очистки электролита. Организованы дополнительные рабочие места высококвалифицированного инженерного и технического персонала.

Другой пример успешной работы вуза с предприятиями реального сектора экономики – выполнение работ в рамках договора с СП «Комацу Мэнуфэкчуринг Рус» (Япония – Россия). В данном случае проведены исследования по разработке рекомендаций использования

высокоэффективного металлорежущего инструмента с наноструктурированным износостойким покрытием. Инновационный проект позволил расширить область применения специального инструмента на операциях механической обработки деталей двигателей строительно-дорожных машин из высокопрочного чугуна FCD. Заказ на данные работы поступил непосредственно от ф. «Комацу» с учетом опыта вуза по выполнению работ в области современного инструментального производства. Определяющее значение здесь имел исследовательский задел РГАТУ, полученный в ходе выполнения серии прикладных НИОКР по государственным контрактам с Министерством образования и науки РФ, РНЦ «Курчатовский институт» и предприятиями.

В области авиационного приборостроения в РГАТУ имени П.А. Соловьева совместно с Рыбинским заводом приборостроения в 2010 -2012гг. реализован инновационный проект по освоению технологии и промышленному производству оптических кристаллов синтетического монокорунда весом до 30 кг для применения в электронике, оптоэлектронике, оптике, точной механике, авиационном приборостроении и лазерной технике.

Еще одной работой, реализуемой в рамках Постановления Правительства РФ №218 является комплексный проект по созданию высокотехнологичного производства «Роботизированный комплекс автоматизированной штамповки лопаток компрессоров ГТД».

Производство лопаток ГТД занимает главное место в структуре производства газотурбинных двигателей. Это обусловлено: наибольшей применяемостью (массовостью) этих деталей в составе двигателей; самым значительным весом в составе трудозатрат производства ГТД; наименьшим ресурсом, по сравнению с ресурсом других типов деталей.

В современных ГТД конструкция лопаток компрессора постоянно усложняется, повышается их нагружаемость, для изготовления применяются более труднообрабатываемые материалы. Сложность геометрической формы,

применение труднодеформируемых и труднообрабатываемых материалов обуславливают низкий коэффициент использования металла (КИМ) и большую трудоемкость изготовления (до 35 % от общей трудоемкости изготовления ГТД).

Традиционные технологические процессы изготовления точных заготовок лопаток на большинстве предприятий отрасли, как в России, так и за рубежом, включают в себя несколько деформирующих операций (предварительное фасонирование, штамповка, калибровка, обрезка облоя) с многократным нагревом заготовок, что приводит к образованию дефектного слоя на заготовках и большим потерям металла в облой и окалину.

Применение более прогрессивных технологических процессов, таких как изотермическая штамповка, штамповка в режиме сверхпластического деформирования, высокоскоростная штамповка позволяют повысить точность штамповок и увеличить КИМ. Не смотря на это основным недостатком данных методов остается высокая трудоемкость и высокая себестоимость изготовления заготовок лопаток компрессора.

Действительно, технология высокоточной штамповки (изотермической) содержит следующую последовательность переходов:

1. Заготовка в виде мерного прутка нагревается в электрической печи до температуры деформирования сплава из которого выполняется штамповка (около 800° С для титановых сплавов).

2. Нагретая заготовка (пруток) на ковочной машине или прессе фасонируется, т.е. пруток деформируется приближаясь к окончательной форме штамповки (формируется предварительно хвостовик и перо лопатки). Переход выполняется с целью дальнейшего точного позиционирования заготовки в штампе.

3. Заготовка смазывается и вновь нагревается в печи до температуры деформирования материала, из которого она выполнена.

4. Нагретую заготовку устанавливают в штамп, предварительно покрытый специальной смазкой; и вновь деформируют. Причем этих

переходов может быть два и более. Штамповку повторяют столько раз, сколько это необходимо для получения геометрии требуемого полуфабриката лопатки.

5. Полуфабрикат отправляют на дальнейшие операции по снятию альфированного слоя, удаления смазки, термическую обработку и т.д.

Наиболее значимыми с точки зрения трудозатрат являются переходы 1-4. Причем длительность процесса штампования 1-2 с., а длительность переходов по перемещению, установке, выбивке полуфабриката из штампа в сотни раз больше. Более того все эти операции выполняются вручную.

Условия труда в технологических цехах штамповочного производства относятся к вредным для человека. Процессы горячей штамповки сопровождаются постоянными вибрациями, высоким уровнем шума, выбросами в атмосферу горячих газов, содержащих вредные вещества, образующиеся в результате нагрева заготовок перед деформированием металла и нанесением смазок, используемых для штамповок. В цехах высок уровень травматизма, связанный с транспортировкой тяжелых горячих полуфабрикатов, обсечкой облоя, разрушением заготовок и штампов под ударами пресса в случае дефектов материала заготовки или износа штампа.

Решением данных производственных проблем является полная автоматизация всего технологического передела горячей штамповки лопаток, позволяющая сократить вспомогательное время технологических переходов (рис. 8). Необходима разработка роботизированного комплекса автоматизированной штамповки заготовок лопаток компрессора ГТД, оснащение его специализированной штамповой оснасткой, модернизация и разработка специального оборудования для осуществления штамповки лопаток в автоматическом цикле [5].

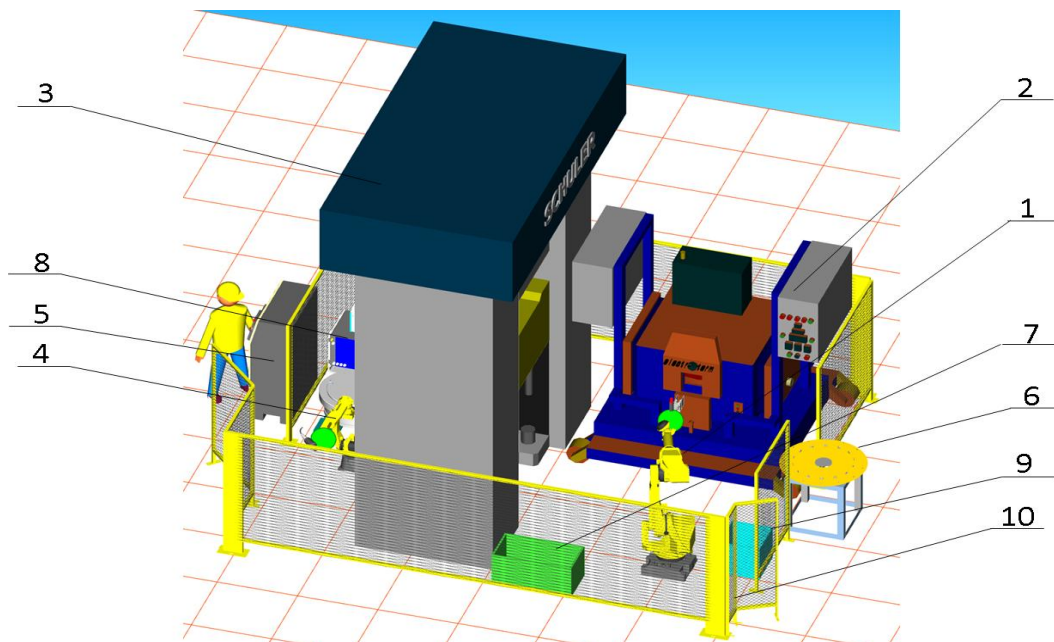


Рис. 8. Модель роботизированного комплекса автоматизированной штамповки лопаток компрессоров ГТД

1 – робот-манипулятор; 2 – электрическая печь; 3 – электровинтовой пресс; 4 – робот для сушки и смазки штампов; 5 – система управления; 6 – магазин-накопитель; 7 – приёмник готовой продукции; 8 – станция обдувки и подачи спрея; 9 – станция охлаждения захвата робота; 10 – ограждение РТК

Таким образом, дальнейшее совершенствование заготовительного производства требует стабилизации режимов штамповки, что позволит осуществлять штамповку лопаток исключительно в автоматическом цикле, обеспечивающем стабильные характеристики состояния полуфабриката на всех этапах штамповки.

Кроме того, автоматизация штамповки лопаток позволит осуществлять эти процессы без использования производственных рабочих, существенно уменьшит влияние человеческого фактора на реализацию процессов горячей штамповки, исключит травматизм и профессиональные болезни, возникающие у обслуживающего персонала кузнечно-штамповых цехов. В результате изменятся и технико-экономические показатели штамповочного производства, а именно:

1. КИМ увеличится в 2-2,5 раза.
2. Трудоемкость изготовления лопаток снизится на 70...80%

3. Себестоимость изготовления снизится на 15...30%
4. Пропускная способность штамповочного оборудования увеличится на 60%
5. Производительность штамповки одного молота составит 600...800 штук в смену.

Успешность реализации РГАТУ проектов в области авиадвигателестроения основывается на применении современных наукоемких технологий, которые во многом определили роль университета в формировании жизнедеятельности инновационного территориального кластера «Газотурбостроение и энергомашиностроение» (рис. 9).

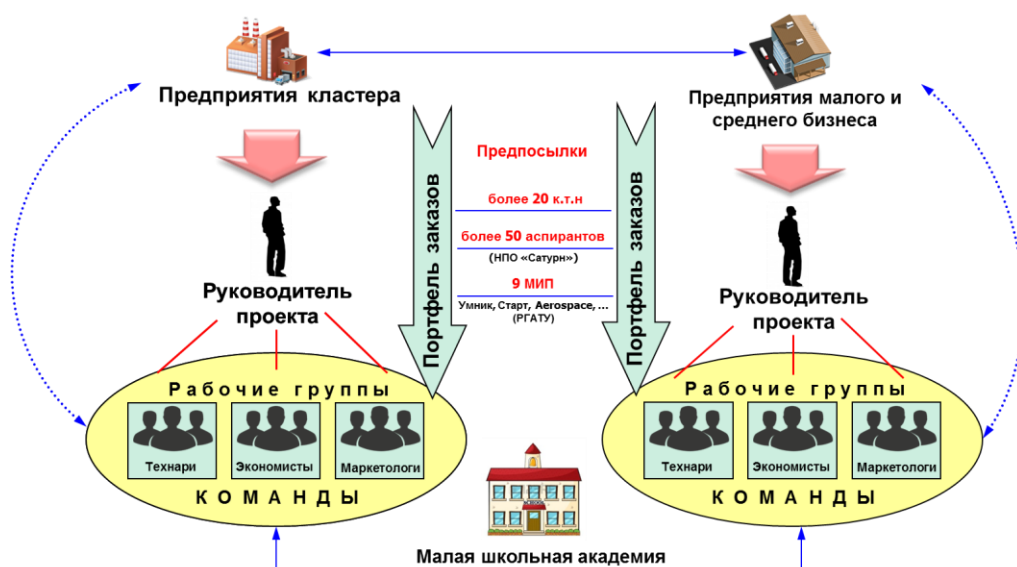


Рис. 9. Роль РГАТУ в формировании жизнедеятельности кластера.

РГАТУ является наукоемкой базой инновационной платформы кластера, обеспечивая: модернизацию промышленного сектора региональной экономики на основе создания высокотехнологичных производств; создание интегрированных в производственный процесс совместных научно-инновационных структур (лабораторий, центров, кафедр); обеспечение потока инноваций в производство; совершенствование учебного процесса за счет внедрения проектно-ориентированных образовательных технологий; совершенствование производственной базы инфраструктуры как предприятий кластера так и самого вуза.

Библиографический список

1. Автоматизация управления организацией производства газотурбинных авиационных двигателей / Под общ. ред. Т. Д. Кожиной, И. Д. Юдина. – Ч. 2. – М.: Машиностроение, 2012.
2. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. Часть первая [Текст] / В. Ф. Безъязычный, В. А. Полетаев, Т. Д. Кожина и др. Под ред. В. Ф. Безъязычного, В. Н. Крылова. – М.: Машиностроение, 2012. – 560 с.
3. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей (Библиотека технолога). – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
4. Кожина Т. Д., Курочкин А. В. Результаты исследовательских испытаний лопаток компрессора газотурбинного двигателя, полученных методом электрохимической обработки // Актуальные проблемы современного машиностроения / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 169 – 177.
5. Касаткин М. Ю., Кожина Т. Д., Соколов Н. Н., Курочкин А. В. Разработка мехатронного комплекса автоматизированной штамповки лопаток компрессоров ГТД // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева. – 2016. – № 1(36). – С. 43 – 48.

T. D. KOZHINA

Federal State-Financed Educational Institution of High Professional Education «P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University»

High technology in aircraft engine

The article presents the main results of innovative activity of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University in the field of aircraft engines, and other technical areas with the use of modern high technologies.

Keywords: Aircraft engine, high technology, innovations, a gas turbine engine

**Автоматизация процессов электролитно-плазменной обработки
пространственно сложных поверхностей токопроводящих изделий
методом контролируемого струйного полива**

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
6 курс, контактный тел.: +7(999)218-55-27

Ключевые слова: Электролитно-плазменная обработка, автоматизация, сложнопрофильные поверхности, финишная обработка.

Аннотация. Данная работа посвящена проектированию оборудования для электролитно-плазменной обработки (ЭПО), которое позволит максимально автоматизировать процесс, и даст возможность обрабатывать любую пространственно сложную поверхность токопроводящего изделия. Спроектированы механическая, гидравлическая и электросиловая части установки для струйного ЭПО, разработаны программы для используемой электроники. Произведены первые успешные эксперименты по струйному полированию образцов из сталей, титана и цветных сплавов.

Область электрохимических и электрофизических методов обработки растет ежегодно. Обусловлено это тем, что мировое машиностроение активно развивается и постоянно ставит новые, более сложные технологические задачи. Комплексными технологиями успешно решается ряд вопросов, таких как финишная обработка поверхности, термообработка, нанесение покрытий и некоторых других.

Однако, как и любая другая технология, электротехнология имеет свой диапазон применимости. Сложное и дорогостоящее оборудование для электрохимических и электрофизических процессов часто проектируется под конкретное изделие или габариты. Кроме того, реализация этих методов часто требует полного погружения детали в электролит, что делает трудной задачу обработки обособленной поверхности.

Главной идеей в работе над данным оборудованием стало стремление локализовать зону обработки, за счет применения струйного полива. Это дает возможность обработать практически любую открытую поверхность путем перемещения сопла подачи электролита и также позволяет использовать источники питания меньшей мощности.

В тоже время есть сложности с применением струйного полива. При воздействии струей с некоторым напором на поверхность, при ее падении вниз или на вертикальную стенку пятно смачивания на границе раздела «струя-заготовка» получается неопределенным со скоростными боковыми потоками, приводящими к срыву или невозможности образования пароплазменной оболочки и как следствие - к неравномерности обработки. Для исключения фактора растекания была разработана специальная схема полива, в которой струя направлена в вертикальном вверх положении, а ее отвод осуществляется вниз за счет сил гравитации (рис.1).

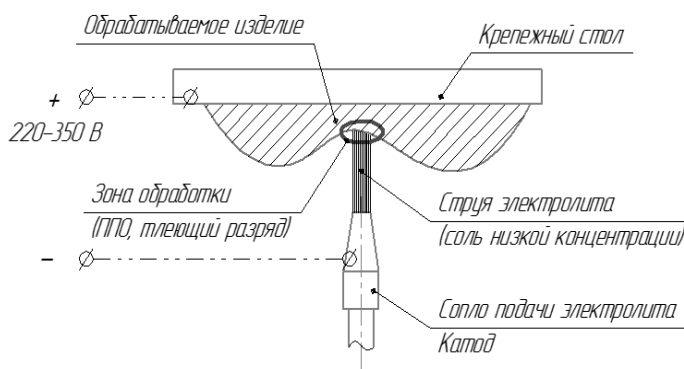


Рис.1. Схема струйной электролитно-плазменной обработки

Электролит отводится в общую емкость. Напор ограничивается таким образом, чтобы высота струи над соплом равнялась величине зазора между соплом и заготовкой. В данном случае пятно контакта струи с заготовкой является строго ограниченным по площади с квазинулевой скоростью боковых струй из пятна смачивания. Ограниченность пятна смачивания и постоянный контроль его размеров позволяют локализовать зону обработки, тем самым обеспечив постоянство технологических параметров, снизить потребляемый ток, повысить качество обработки.

Фиг. 1

Разработанная установка содержит емкость 1 с электролитом 2, в качестве которого используется водный раствор соли низкой концентрации; обрабатываемое изделие 3 из электропроводного материала; источник постоянного тока 4, положительный полюс которого подключен к обрабатываемому изделию 3; нагнетающий насос 5; нагревательный элемент 6; насадка (катод) 7 на выходе главной магистрали 8, закрепленный на механизме позиционирования по трем координатам 9; юбку защиты от

разбрызгивания электролита 10; сливной шланг 11; двухосевой поворотный стол 12; фильтр грубой очистки электролита 13, электрический шкаф 14. Электрический шкаф включает в себя: блок контроля температуры и напора электролита 15; блок управления шаговыми двигателями 16. Для контроля температуры используется термомеханическое реле 17, подключенное к блоку 15.

Первые эксперименты по полированию изделий на прототипе разработанного оборудования выполнены успешно. При полировании нержавеющей стали удалось достичь показателя шероховатости Ra 0,05 при исходном уровне микронеровностей Ra 0,36. Работа получила высокие отзывы от машиностроительных предприятий-партнеров, и, безусловно, требует проведения дальнейших исследований и работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинский И.А. Сложные поверхности. Математическое описание и технологическое обеспечение. Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние. - 1985.-263 с.
2. Грилихес С.Я. Электрохимическое полирование. Л.: Машиностроение. 1976.-205 с.
3. Саушкин Б.П., Атанасянц А.Г. Электроразрядные процессы в технологиях машиностроительного производства. // Металлообработка. -2006. №2
4. Ясногородский И.З. Нагрев металлов и сплавов в электролите. М.: Машгиз.- 1949. 128 с.
5. Белкин П.Н., Белкин С.Н. Стабилизация парогазового слоя при анодном нагреве в растворах электролитов // Инженерно-физический журнал. 1989. - Т. 57. - № 1. - С. 159. Деп. в ВИНТИ 06.02.89. рег. №781-В 89.
6. Ушомирская Л.А., Веселовский А.П., Головицкий А.П., Куминов С.Е. Особенности развития электрического разряда при электролитно-плазменном полировании // Металлообработка. 2006. - № 4. - с. 13-15.
7. Патент США (US) N 5028304, кл. В 23 Н3/08, С 25 F 3/16, С 25 F5/00 опубликован 02.07.91..

8. Патент RU 2355829 «Способ электролитно-плазменного полирования металлических изделий» Дата публикации заявки: 27.10.2008.
 9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Гардарики. - 2002. - 638 с.
 10. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979.
 11. ГОСТ Р МЭК 61140-2000. Защита от поражения электрическим током.
 12. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность.
-

Automation of electrolytic-plasma processing of crooked spatial surfaces of electrically conductive products with the jet watering technique

Authors: ¹D.A. Zarubin, ²M.M. Khuramshin, ³S.N. Sergeev, ⁴K.E.Pavelchuk, ⁵B.M. Kirillov

About authors: ^{1,2,3,4,5} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 6th year of studying, tel.: +7(999)218-55-27

General words: electrolytic-plasma processing, automation, crooked spatial surface, finishing process.

Annotation. This work is dedicated to the development of electrolytic-plasma elaboration equipment, which will allow to automate processes and will give the opportunity to elaborate any crooked spatial surfaces of electrically conductive products. During this project mechanical, hydraulic and electrical parts of equipment were developed for the jet glazing electrolytic-plasma elaboration. Moreover, control software for the used electronics is engineered and first experiments of polishing with different materials are done.

А. В. Назарьев, П. Ю. Бочкарёв

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ
УСТАНОВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПОДГОТОВКОЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ**

Александр Викторович Назарьев, аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов», Российская Федерация, г. Саратов, e-mail: alex121989@mail.ru, +79297704399.

Петр Юрьевич Бочкарёв, научный руководитель, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов», Российская Федерация, г. Саратов, e-mail: bpy@sstu.ru.

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема обеспечения эффективных механических средств, основанных на связи между проектированием процессов механической обработки и сборки. Сформулирована структура комплексного подхода (комплекс проектных процедур) с учетом которого рассмотрены реальные производственные ситуации. Кроме того, представлен анализ возможных алгоритмов реализации комплексного подхода (комплекс проектных процедур) в системе автоматизированного планирования технологических процессов.

Ключевые слова: комплекс проектных процедур, процесс проектирования, высокоточные системы, конфигурационное пространство.

**ENSURE OF THE EFFECTIVE MANUFACTURING OF THE
HIGH-PRECISION UNITS BASED ON THE LINKS BETWEEN THE
PROCESS DESIGN OF MACHINING AND ASSEMBLAGE**

A.V. Nazaryev, P.Yu. Bochkarev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, The Russian Federation, e-mail: alex121989@mail.ru; bpy@sstu.ru

Annotation. This article considers the problem of ensure of the effective mechanical facilities based on the links between the process design of machining and assemblage. The

structure of the complex approach (complex of the design procedures) taking into account this links and real manufacturing situation is formed. Also, analyzes of the possible algorithms of realization of the complex approach (complex of the design procedures) in system of computer-aided planning of the manufacturing methods.

Keywords: complex of design procedures, process design, high-precision units, configurational space.

В настоящее время проблема совершенствования машиностроительных производств приобретает первостепенное значение, т.к. развитие данной отрасли происходило стихийно, что в итоге сделало ее расточительной в расходе материальных, энергетических и трудовых ресурсов, отрицательно влияющими на состояние окружающей среды и т.п. Особенно ярко это проявляется при изготовлении высокоточных узлов, применяемых в изделиях для авиационно-космической промышленности, прецизионного станкостроения, двигателестроения и пр., т.к. данные отрасли характеризуются жесткими, постоянно возрастающими требованиями к качеству изготовления машин. Обеспечение данных требований существующими методами связано в основном с чрезмерными проблемами, решение которых достигается в большинстве случаев затратными способами в виде многочисленных переборок, доработок и уточнения конструкции, поскольку эти требования в серийном производстве находятся на грани максимально технологически достижимых. Кроме того, значительные трудности, особенно на этапе сборочного производства, вызывает влияние непознанных и неуправляемых причин, вызывающее непрогнозируемый разброс заданных эксплуатационных характеристик [1], [2].

В связи с тем, что основными особенностями эффективного функционирования машиностроительных предприятий являются сжатые сроки и высокое качество технологической подготовки производства (ТПП), необходимо создание комплексного подхода (комплекса проектных процедур) к решению существующих задач в машиностроении, особенно сборки высокоточных изделий [2].

На сегодняшний день наблюдаются разрозненные решения отдельных задач этой проблемы, таких как повышение качества и точности собираемых изделий, снижение затрат на материалы, внедрение ресурсосберегающих технологий и т.п., отсутствует наиболее приближенная к реальным требованиям концепция системы в целом [1].

Предлагается подход, который основывается на установлении связи между технологической подготовкой обрабатывающего и сборочного производств, с учетом требований, заложенных при проектировании изделия. В общем виде связь представлена на рис. 1. Данный подход позволит в зависимости от складывающейся производственной ситуации выбирать оптимальные технологические процессы обработки элементов, учитывающих требование последующей сборки. Что, в свою очередь, позволит снизить трудоемкость изготовления, время изготовления и стоимость, повысить качество и точность высокоточных изделий, сократить время и трудоемкость при технологической подготовке производства.

Реализация комплекса проектных процедур подразумевает анализ требований к сборке изделия и возможных технологических процессов обработки их элементов (далее технологических процессов) и выбор на основе анализа оптимальных технологических процессов. Данный анализ включает в себя несколько этапов:

1. Учет требований конструкторской и технологической документации (точность, качество, последовательности при изготовлении и сборке деталей (сборочных единиц) и т.д.).

В отечественном производстве сложилась тенденция к заданию допусков на двумерных чертежах отдельных деталей, получаемых из 3D моделей САД-систем, т.к. в геометрических моделях современных систем автоматизированного проектирования (САПР) используется только номинальная геометрия, а допуски носят характер аннотаций [3]. Данная концепция является препятствием на пути автоматизации ТПП, т.к. файлы 3D моделей сборок не содержат данных о допусках и размерных

взаимосвязях в сопряжениях деталей сборок, что сказывается на сроках ТПП и качестве конечного продукта.

Для автоматизации данного этапа может быть применена математическая модель представления и анализа деталей и сборок (в том числе и высокоточных) с использованием понятия конфигурационного пространства [3].

2. Выбор деталей (сборочных единиц), входящих в высокоточное изделие и поиск (создание) возможных технологических процессов их механической обработки.

Разработка технологических процессов неавтоматизированными методами в условиях многономенклатурного производства позволяет сравнивать ограниченное число вариантов на отдельных этапах проектирования, что приводит к потере качества технических решений и увеличению сроков ТПП. Одним из подходов, позволяющих автоматизировать ТПП, является концентрация гибких технологических процессов. Данный подход является основой разрабатываемой в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина автоматизированной системы планирования технологических процессов, обеспечивающей параллельное проектирование технологических процессов в рассматриваемый период времени с учетом реально складывающейся производственной ситуации [4], [5].

3. Проведение размерного анализа возможных технологических процессов. Выявление технологических процессов, удовлетворяющих требованиям сборки изделия и конструкторской документации на деталь (сборочную единицу) по заданным параметрам. В общем виде данный пункт представлен на рис. 2.

Размерные связи машиностроительных деталей представляются графом, вершины которого обозначают элементарные поверхности, а ребра – размерные связи между ними. Для автоматизации расчета технологических размерных цепей может быть использован алгоритм, исходными данными

для которого являются граф технологического процесса и размерные цепи [6].



Рис. 1. Связь между

технологической подготовкой
обрабатывающего и сборочного
производств, с учетом требований,
заложенных при проектировании

высокоточных изделий

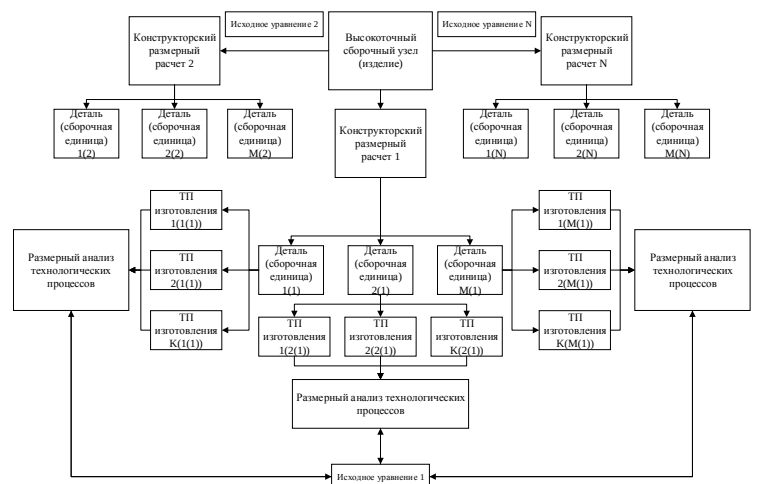


Рис. 2. Схема выявления оптимальных

технологических процессов обработки элементов
изделия в общем виде

4. Выбор технологических процессов с минимальным временем, затраченным на их реализацию, и минимальным количеством поверхностей

5. Сравнение размеров исходных заготовок для технологических процессов. Выбираются технологические процессы, в которых используются заготовки с минимальными размерами.

6. Анализ применяемого в технологических процессах оборудования. Выбираются те технологические процессы, для реализации которых на предприятии имеется все необходимое оборудование.

В данной статье была сформирована структура комплекса проектных процедур для эффективного выполнения сборочных операций на основе связи между технологической подготовкой обрабатывающего и сборочного производств высокоточных изделий.

Библиографический список

1. Семенов, А. Н. Проблемы теоретического обеспечения сборки высокотехнологичных изделий// Инструмент и технологии. 2004. № 21 - 22. С. 122 -124.
2. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник / Б. М. Базров. - М.: Машиностроение, 2005. - 736 с.
3. Шабалин, А. В. Конфигурационные пространства для оценки собираемости изделий машиностроения с пространственными допустимыми отклонениями [Рукопись]: дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08 / А. В. Шабалин; Иркут. гос. техн. ун-т. - Иркутск, 2011. - 170 с.
4. Митин, С.Г. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве [Текст] / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Инновационная деятельность. - 2013. - № 4 (27). - С. 36-40
5. Митин, С.Г. Формирование методического обеспечения автоматизированной подсистемы проектирования операций фрезерной обработки [Текст] / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Научные технологии в машиностроении. - 2012. - N 1(07). - С. 32-39
6. Мухолзоев, А.В. Алгоритм модуля автоматизированного расчета технологических размерных цепей [Текст] / А. В. Мухолзоев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т.15, №3. – С. 48-55

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ В
МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ
ПРОИЗВОДСТВАХ**

Евгения Павловна Решетникова, аспирант, СГТУ имени Гагарина Ю.А.,
Россия, г.Саратов, purpose22@mail.ru
Петр Юрьевич Бочкарев, д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А.,
Россия, г.Саратов, bpy@sstu.ru

Аннотация. Совершенствование технологического оснащения механообрабатывающих производств их интенсивный рост и развитие способствуют возможности быстрого освоения выпуска нового вида продукции. Значительная доля обрабатываемых деталей в машиностроении имеет сложные поверхности. С целью улучшения качества производимых изделий совершенствуют, как обрабатывающее оборудование, так и методы контроля изделий. Однако это приводит к увеличению временных и материальных затрат на конструкторско-технологическую подготовку производства и снижению качества принятых проектных решений при разработке конструкции деталей, особенно в условиях изменяющейся производственной ситуации. В данной статье представлено одно из решений этой задачи, и им является автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства. Качество принятых проектных решений зависит от их взаимосвязанности с точность получения размерных взаимосвязей изготавливаемой детали.

Ключевые слова: детали со сложными поверхностями, многономенклатурное производство, производственная система, конструкторско-технологическая подготовка производства, методика контроля.

**IMPROVING PRODUCTION ENGINEERING OF MANUFACTURE
COMPLEX-SURFACES PARTS MACHINING IN HIGH-MIX
MANUFACTURING**

E. P. Reshetnikova, P.Yu. Bochkarev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

Annotation. Improvement of technological equipment machining industries because of their intensive growth and development contribute to the possibility of quick production of a new product. A significant proportion of workpieces in the engineering industry has a complex surface. With the aim of improving the quality of the products improve, as processing equipment, and control methods of products. However, this leads to increased time and material costs on design-technological preparation of production and reduce the quality of the design solutions during the development of the design details, especially in the context of changing production situation. This article presents one solution to this problem, and it is automation of design and technological preparation of production. The quality of the design solutions depends on their interrelation with accuracy of obtaining the dimensional relationships of manufactured parts.

Keywords: parts with complex surfaces, multiproduct production, production system, technological preparation of production, methods of control.

Технологическая подготовка производства включает в себя совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделий необходимого качества при заданных сроках, объеме выпуска, и включает в себя обеспечение технологичности конструкции изделия, проектирование технологических процессов, проектирование и изготовление средств технологического оснащения, управление процессом технологической подготовки производства. В современных условиях рыночных отношений задачей машиностроительных производств является обеспечение выпуска широкой номенклатуры деталей с достижением высокого экономического эффекта. Это требует высокой гибкости производственной системы, и разработки технологических процессов на основе максимального использования технологических возможностей современного оборудования и эффективного использования и его функционального потенциала, для обеспечения быстрого перехода на обработку новых деталей при расширении номенклатуры.

В машиностроении значительная доля обрабатываемых деталей имеет сложнопрофильные поверхности, что в свою очередь предъявляет повышенные требования к точности, надежности и производительности их изготовления. Проведенный анализ подходов к технологической подготовки производства таких деталей показал несовершенство, как на этапе функционирования производства обработки деталей со сложными поверхностями, так и подготовки производства. Также анализ показал, что процесс проектирования заключается в следующем: по заданным требованиям конструктор выбирает приемлемую структуру

технологического процесса, а затем формирует данные, необходимые для расчета и проектирования. Такой подход требует принятия решений, основанных на интуиции и опыте технолога, и, следовательно, нельзя говорить о высокой надежности разработанного процесса обработки детали, созданных в его рамках, а также оптимальности принятия технологических решений [1, 2].

В настоящее время выбор процесса технологии обработки детали основывается на усредненных конструктивных характеристиках, заложенных конструктором и информации о выбранном методе получения заготовки. На первоначальном этапе выбора технологического процесса при определении конструктивных требований к заготовке, устанавливаются пределы допусков на конкретные размеры заготовки. Усредненные показатели не дают рационального технического решения для обработки деталей, выбора оснастки, технологического инструмента, в итоге разрабатывается технологический процесс, не обеспечивающий требуемой точности размерных связей детали, либо точность достигается со снижением производительности труда и повышением себестоимости изделия [2].

Для решения данной проблемы предлагается методика, которая основывается на установлении реальных характеристик заготовок, а не усредненных требований к конструктивным показателям заготовок. На основе определения и уменьшения допусков размерных связей конкретных значений обеспечивается требуемая точность размерных взаимосвязей параметров детали. В результате разрабатывается технологический процесс обработки и достигается требуемая точность изготовления при наименьших затратах на процесс производства детали.

Разрабатываемая методика, представленная в виде схемы (рис.1) определяет последовательность действий выполнения проектных процедур по разработке технологического процесса с учетом реальных размерных характеристик конкретной детали. Для этого вводится этап определения значений параметров заготовки детали, а именно операция контроля на этапе

анализа и получения штучной заготовки (поковка, отливка, штамповка) и установления ее годности, а также ответ на вопрос о возможности получения детали требуемой точности из заготовки по заданным в конструкторской документации показателям [3, 4]. На следующем этапе методики определяющим является уменьшение допусков размерных взаимосвязей и обеспечение конкретных требований к изготовлению детали.

Повышение точности деталей сопровождается возрастанием требований к точности и достоверности результатов измерения конструктивных характеристик. Соответственно повышаются требования к измерительным приборам и методам обработки результатов измерений. Производственные условия обуславливают необходимость использования различного типа приборов в зависимости от заданной точности, производительности и степени автоматизации контроля. Для контроля характеристик на этапе изготовления необходим выбор рационального состава средств измерений. В последнее время для ускорения выхода продукции на рынок используется принцип автоматизации процесса контроля на основе трехмерной модели контролируемой детали. Используется координатно - измерительные машины (КИМ) различного типа, наиболее часто они применяются для контроля деталей со сложными элементами детали. Использование КИМ позволяет оперативно измерять геометрические параметры простых и сложных прецизионных деталей, включая корпусные, измерение которых традиционными способами требует дорогостоящей специальной оснастки или измерение которых невозможно вообще, сокращать время на наладку обрабатывающих станков, центров и модулей за счет быстрого и достоверного контроля первых обработанных деталей из последующей партии; исключать брак, используя постоянный контроль точности процесса обработки деталей, и своевременно корректировать его. Контроль же простых плоских деталей, таких как прокладки, накладки, фигурные шайбы, может по-прежнему осуществляться с помощью обычных универсальных средств (штангенциркуля, микрометра)

или по шаблону, потому что использование КИМ в этих случаях не рационально. Предлагается модель выбора необходимого средства измерения в зависимости от сложности контроля параметров поверхности изготавливаемой детали.

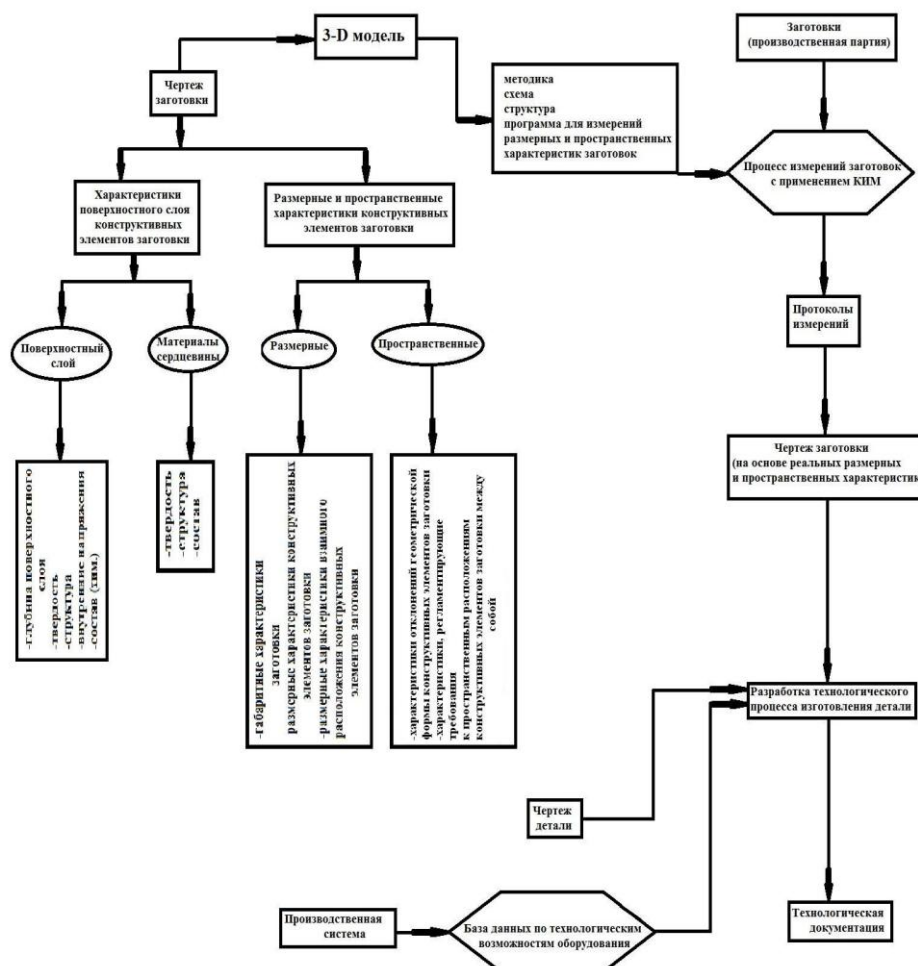


Рисунок 1. Схема технологической подготовки производства изготовления сложнопрофильных деталей для условий многономенклатурных производств.

Предлагаемая методика позволяет совершенствовать технологический процесс изготовления сложнопрофильных деталей для механообрабатывающих многономенклатурных производств на основе учета конструктивных особенностей реальных заготовок посредством 3D-

моделирования и рационального назначения контрольно – измерительных средств, а также применения автоматизированного проектирования в системе планирования многономенклатурных технологических процессов.

Литература

1. Митин С. Г. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве/ С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Инновационная деятельность. - 2013. - № 4 (27). - С. 36-40.
2. Митин, С. Г. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем/ С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Научные технологии в машиностроении. - 2014. - № 11 (41). - С. 44-47.
3. Бочкарев П. Ю. Методика координатного измерения сферических поверхностей / П. Ю. Бочкарев, О. В. Захаров, Е. П. Решетникова // Сборник научных трудов SWorld. 2013. № 2. С. 28-31.
4. Курносенко А. И. Об алгоритмах обработки координатных измерений круглых профилей и сферических поверхностей / А. И. Курносенко // Измерительная техника. 1992. № 1. С. 25-27.

ДИАГНОСТИКА СОТС ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ТРИБОМЕТРИИ

Сведения об авторах

1. Годлевский Владимир Александрович¹ доктор технических наук, Ивановский государственный университет, Россия, Иваново godl@yandex.ru
2. Железнов Антон Геннадьевич, кандидат технических наук Ивановский государственный университет, Россия, Иваново antonzhelezn@gmail.com
3. Сандлер Владимир Абрамович кандидат физ.-мат. наук Ивановский государственный университет, Россия, Иваново v.a.sandler@gmail.com
4. Смирнова Антонина Игоревна, канд. хим. наук Ивановский государственный университет, Россия, Иваново antonia_smirnova@mail.ru
5. Усольцева Надежда Васильевна, доктор. хим. наук Ивановский государственный университет, Россия, Иваново nv_usoltseva@mail.ru
6. Березина Елена Владимировна. доктор технических наук, Ивановский государственный университет, Россия, Иваново elena_berezina@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Показано, что оптимизация химического состава СОТС должна производиться с учетом надмолекулярной самоорганизации в смазочном слое. Для решения этой задачи предложен прибор «поляризационный трибометр», принцип которого основан на преобразовании поляризационных характеристик лазерного луча, проходящего через смазочный слой в процессе сдвиговой деформации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Резание металлов; СОТС, диагностика; поляризационный трибометр;

Современные СОТС для обработки металлов резанием являются сложными многокомпонентными системами, включающими в себя трибоактивные компоненты разной химической природы и разного механизма активности. Правильно выбранное СОТС позволяет снизить энергозатраты на обработку, повысить стойкость инструмента и качество

¹ Автор, с которым следует вести переписку

обработанной поверхности [1]. Условия экстремального трения, существующие в зоне резания между инструментом, стружкой и заготовкой заставляют внимательно изучать кинетику смазочного действия при резании и особенности протекающих при этом физико-химических процессов. Требуемая трибологическая эффективность СОТС обеспечивается формированием подходящего пакета присадок к водной или масляной базе.

При этом в составе СОТС используют присадки двух основных типов: химически-активные и поверхностно-активные. Поскольку применение химически-активных компонентов становится все более ограниченным в силу требований санитарии и экологии, все большее применение получают так называемые «присадки структурного действия», которые формируют в зоне резания слои, упорядоченные на атомно-молекулярном уровне. Такие поверхностные структуры подобны по своему строению жидким кристаллам и обладают в упорядоченном состоянии повышенной смазочной способностью [2]. Возникает вопрос, по какому принципу, с использованием каких экспериментальных методик следует конструировать новые составы СОТС, чтобы выбор химической природы компонентов происходил по принципу оптимальной структурной самоорганизации смазочного слоя.

Поляризационная микроскопия является распространенным методом исследования фазового состояния соединений, в том числе мезоморфных структур. Она позволяет наблюдать эффекты объемного структурирования в растворах. Это дает возможность использовать данную методику и для оценки фазового состояния смазочных материалов в тонких слоях, вплоть до граничных. Обнаружение двулучепреломляющих текстур в объеме смазочного материала позволяет предполагать повышенную склонность к самоорганизации граничного смазочного слоя на поверхности. Ориентационные эффекты на молекулярном уровне, происходят не только и не столько в силу близости поверхностных атомов, сколько в результате приповерхностного сдвига.

С тем, чтобы выявлять, каким образом молекулярные ориентационные эффекты влияют на реологические свойства смазочного слоя, были предложены устройства типа «поляризационного трибометра», позволяющие использовать взаимодействие поляризованного луча света со смазочным веществом, в котором происходит сдвиг [3]. Задачей нашего эксперимента была одновременная регистрация силы трения и оптического сигнала, отражающего анизотропию смазочного материала на поляризационном трибометре оригинальной конструкции [4].

Если принять такую схему трения, когда два диска образуют трибосистему своими плоскими поверхностями при их вращении, можно считать, что параметр анизотропии мезогенного материала смазочного слоя («параметр порядка») пропорционален интенсивности светопропускания. Последняя, в свою очередь, зависит от среднего слоевого напряжения деформации или от крутящего момента при относительном движении поверхностей трения.

Поскольку в таком эксперименте нельзя измерить локальное сопротивление сдвигу (крутящий момент) в той области, где ведется непосредственное измерение светопропускания, то следует принять, что данный момент пропорционален некоторому усредненному моменту, который и измеряется моментомером трибометра, отражая сопротивление сдвигу на всей площади смазочного слоя.

Для описания реологической картины описанной выше трибосистемы была построена математическая модель движения жидкости при установившемся течении, являющаяся следствием уравнения Навье-Стокса в цилиндрических координатах при заданных граничных условиях. В результате решения уравнений данной модели стала возможной оценка параметра анизотропии как некоторого соотношения усредненных параметров ориентации отдельных молекул смазочного материала в состоянии покоя и вращательной составляющей анизотропии, вызванной сдвигом.

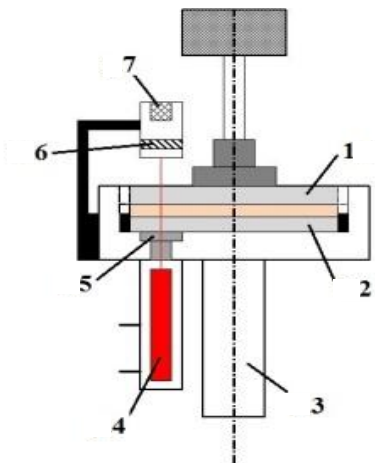


Рис. 2. Схема поляризационного трибометра: 1,2 – подвижное и неподвижное оптические окна, 3 – микрометрическое устройство, 4 – лазер, 5 – диафрагма, 6 – поляризатор-анализатор, 7 – фотоприёмник.

Для отработки методики поляризационной трибометрии и проверки модели в первом приближении была проведена серия экспериментов на поляризационном трибометре с вращательной схемой. В качестве тестовых объектов для испытаний нового прибора использовали два типа жидкотекучих мезогенных смазочных материалов: на масляной и водной основе с разными мезогенными присадками различной концентрации.

Было обнаружено, что для обоих типов модельных смазочных материалов (водного и масляного) характерно изменение фотоответа в зависимости от скорости сдвига и толщины рабочего зазора. Отклонения от ньютоновского типа течения увеличивались при снижении скорости сдвига и уменьшении толщины слоя.

При испытании разбавленных (до 5 масс. %) водных растворов ряда ионогенных ПАВ фотоответ не был обнаружен, что, возможно, говорит о недостаточной чувствительности оптико-электрической схемы. Были получены свидетельства того, что при остановке сдвигового процесса не происходит быстрого возврата интенсивности оптического сигнала к исходному состоянию. Такого рода гистерезис ориентационного эффекта может служить одной из дополнительных характеристик «мезогенности» смазочного материала и приводит к заключению о необходимости

исследовать закономерности изменения оптических сигналов в переходных процессах (при пусках и остановах привода прибора).

Анализ данных, полученных в ходе проведенных экспериментов, позволяет заключить, что в качестве характеристики, как степени упорядоченности, так и трибологической эффективности смазочных составов можно принять интенсивность светопропускания смазочного слоя.

В ходе поляризационно-трибометрических экспериментов качественно подтверждена справедливость зависимостей, а именно то, что принятая в качестве параметра упорядоченности интенсивность светопропускания существенным образом зависит от скорости взаимного перемещения измерительных поверхностей. Эти факты свидетельствуют в пользу эффективности предлагаемого метода при исследованиях ньютоновских смазочных композиций. В связи с тем, что изменение вязкости неньютоновских смазочных составов в условиях стационарного сдвига при постоянной температуре отражает структурные изменения в их объеме, можно утверждать, что предлагаемый метод пригоден и для таких сред.

Рассмотренные модели толстых слоев позволили объяснить результаты экспериментов, в ходе которых регистрировался рост интенсивности светопропускания слоя смазочного материала при увеличении его толщины. Таким образом был идентифицирован объемный тип упорядочения в слое.

Установлена корреляция между оптическим откликом смазочного слоя на сдвиговое воздействие и трибологической эффективностью смазочного состава. Триботехнические испытания модельных составов СОТС производились на поляризационном трибометре, на машине трения СМЦ-2 и в условиях обработки низкоуглеродистой стали сверлением. Полученные результаты показали возможности применения метода поляризационной трибометрии при оценке трибологической эффективности смазочных составов для узлов трения машин и процессов металлообработки.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобразования РФ (Проекты №№ 9.700.2014/К, 4.106.2014/К).

Литература

1. Astakhov V.P., Godlevskiy V.A., Joksch S. Rave A. Evans R. Metalworking fluids for cutting and grinding: fundamentals and recent advances. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, UK. 2012. 413 p.
2. Ермаков С.Ф. Трибология жидкокристаллических материалов и систем. Минск, Беларуская навука, 2012, 380 с.
3. Левченко В. А. Нанотрибология // Современная трибология: успехи и перспективы. М. Изд-во ЛКИ, 2008, С. 324–325.
4. Годлевский В.А., Сандлер В.А., Березина Е.В. и др. Патент 2569038 РФ МПК G01N (2006.01), G01D (2006.01). Поляризационный трибометр. №2014113720/28. Заявлено 08.04.2014. Оpubл. 20.11.2015. Бюл №32.

**Godlevskiy V.A., Zheleznov A.G., Sandler V.A., Smirnova A.I.,
Usol'tseva N.V., Berezina E.V.**

Ivanovo State University, Ivanovo, Russia

DIAGNOSTICS OF METALWORKING FLUIDS BY METHOD OF POLARIZING TRIBOMETRY

Abstract

It is shown, that optimisation of chemical composition of metalworking fluids should be made with the account of supramolecular self-organising in lubricant layers. For the decision of this problem the device «polarizing tribometer» which principle is based on transformation of polarising characteristics of the laser beam which is passing through a lubrication layer in the course of shear deformation is offered.

Key words

Metal cutting; metalworking fluids, diagnostics; polarizing tribometer.

Е.А. Белкин, В.Н. Поярков, Ю.С. Степанов

Установка голографического контроля над процессом формирования микрорельефа

Евгений Александрович Белкин

доктор технических наук,
зав. лаб. «Голографические исследования в приборостроении»,
ОАО «Болховский завод полупроводниковых приборов»,
Россия, Орловская обл., г. Болхов
E-mail: belkine.a@ya.ru

Вячеслав Николаевич Поярков

кандидат технических наук,
ген. директор,
ОАО «Болховский завод полупроводниковых приборов»,
Россия, Орловская обл. г. Болхов
E-mail: oaobzpp@list.ru.

Юрий Сергеевич Степанов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
директор НОЦ «ОрелНано»
Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева,
Россия, г. Орел
E-mail: yury057@yandex.ru

The holographic setup control over the process of formation of the microrelief

Belkin E.A.

The Doctor of technical sciences,
The head of the lab "The holographic researches of the instrument making",
ОАО " Bolhov Plant of semiconductor devices, " Russia, Orel region, g.
Bolhov

Poyarkov V.N.

The candidate of technical sciences,
The general director of
ОАО «Bolhov Plant of semiconductor devices, "Russia, Orel region, g.
Bolhov

Stepanov Y.S.

The doctor of technical sciences,
Professor, honored scientist of the Russian Federation,
Orel state University. Ivan Turgenev,
Russia, Orel region, g. Orel

Аннотация

Дано обоснование возможности прогнозирования разработки приборов пассивного и активного неразрушающего контроля, позволяющих проводить оценку на основе трехмерных геометрических моделей.

Представлена установка голографического контроля, позволяющая сканировать голографическое изображение объекта в видимом интервале электромагнитных волн и позволяющая получить характеристики поверхности для структурирования ее трехмерной модели на основе модульно-геометрического подхода.

Ключевые слова: инженерия поверхности деталей машин, установка голографического контроля, топография микрорельефа.

Abstract

The substantiation of possibility of forecasting of development of devices for passive and active nondestructive control, allow evaluation on the basis of three-dimensional geometric models.

Presents the holographic setup control, a scanning holographic image of the object in the visible interval of the electromagnetic waves and allows obtaining surface characteristics to structure its three-dimensional model based on modular-geometric approach.

Keywords: Engineering of surface of machine components, the holographic setup control, topography of micro relief.

1. Оценка научно-технического уровня разработок и исследований

Современные приборы контроля микрорельефа поверхностей деталей сконструированы так, что входящие, в них регистрирующие элементы позволяют лишь фиксировать параметры микрогеометрии профилей деталей с так называемых контурных карт объекта. Карты определяются с большими погрешностями, за достаточно большие промежутки времени, что делает контроль низким по точности и малоэффективным для производства. Заявленное разрешение шероховатости 10 нм в приборах TR200, Hommet Tester T500 и т.д. при радиусе закругления алмазной иглы в 2-5 мкм вызывает сомнение т.к. фиксируется изменение разности потенциалов между

поверхностями иглы и детали при изменении расстояния между ними. Микронеровности высотой 10 нм при трассировании не могут быть причиной «подпрыгивания» иглы, радиус поверхности полусферы которой в 100 раз больше. Для того чтобы игла сдвинулась по вертикали на 10 нм требуется препятствие по размерам сравнимое с иглой. Отсюда точность определения шероховатости щуповым прибором порядка 1 мкм. Щуповые приборы не пригодны для определения топографии микрорельефа поверхности, если топография определяется на основе восстановления естественной кривизны микрорельефа.

К тому же осуществить контроль над труднодоступным объектом, например, абразивным зерном в процессе шлифования, движущемся в материале, вообще не представляется возможным.

Оптические приборы контроля геометрии тел вращения ViciVision (Ostec) и тел сложной формы MetraSCAN и т.д. не позволяют получить суперпозицию геометрии и топографии микрорельефа детали, имеющих аналитическое задание. Это особенно важно при обработке аэрогидродинамических поверхностей.

Голографические методы контроля, как правило, основаны на исследовании интерференционной картины объекта и для решения вышеуказанных задач не подходят.

В связи с этим, одним из путей, позволяющих как повысить точность, так и расширить возможность контролирующих устройств – является применение системных комплексов, исследующих голографическое изображение объекта контроля.

Принцип контроля рассматриваемых системных комплексов основывается на последних исследованиях процессов получения голографических изображений объектов в оптическом и рентгеновском диапазонах. Системные комплексы этой серии позволяют изучить процессы обработки не в проекции на плоскость, а в пространстве и не только на входе

и выходе, а в данный момент времени, тем самым контролируя поэлементно весь процесс.

В настоящее время в России на базе ОАО «Болховский завод полупроводниковых приборов», г. Болхов Орловской области создана лаборатория «Голографические исследования в приборостроении». На базе этой лаборатории разрабатывается и собирается опытный образец УГК (Установка голографического контроля) для неразрушающего голографического 3D-контроля геометрии деталей с обеспечением нано - и микрометрического диапазона точности измерений и их визуализации.

Аналогов установки голографического 3D-контроля размеров сложных деталей машиностроения как универсального оборудования для современных промышленных предприятий в стране и за рубежом нет.

2. Описание установки голографического контроля и сфера ее применения

Установка голографического контроля [1] представляет собой комплекс систем, включающих лазерные, оптические, электромеханические и микропроцессорные подсистемы. Совокупная работа этих систем под управлением контроллера позволяет осуществлять высокоточный голографический 3D-контроль сложнопрофильных деталей размером до 2000 мм×500 мм×1000 мм.

С погрешностью не более 245 нм (сине-зеленый свет) при работе в видимом диапазоне [2] и погрешностью не более 0,5 нм при работе в рентгеновском диапазоне для $\lambda \sim 10^{-3} \text{ \AA}$ (мягкий рентген) и погрешностью не более 0,0005 нм для $\lambda \sim 0,001 \text{ нм}$ [3]. Причем контроль производится до и после обработки, а также в ее процессе на различных этапах.

Высокоточный контроль сложнопрофильных деталей требуется при осуществлении промышленного производства современных изделий машиностроения: точной механики, штампов, шпинделей, люнетов, твердосплавного инструмента в станкостроении; оживальных частей (головных частей боеприпасов), кумулятивных воронок боевой части,

гироскопов, рулей, в производстве снарядов и ракет; лопаток турбин, в насосах, турбонасосных агрегатов и других аналогичных элементов.

3. Метрологическое обеспечение установки голографического контроля, позволяющей проводить оценку на основе трехмерных геометрических моделей

Существует один из путей расширения возможностей контролирующих устройств и использования информации полученной с их помощью, для построения трехмерных моделей, применение системных комплексов исследующих голографическое изображение объекта, которые входят в состав установки голографического контроля. Это профилограф, работающий в оптическом интервале частот электромагнитных волн и рентгенопрофилограф активного контроля.

Конструктивные особенности системных комплексов этой серии позволяют для моделирования исследуемой поверхности использовать модульно-геометрический подход [4-6].

Модульно-геометрический подход позволяет в свою очередь, получить топографию микрорельефа (рис. 1., 2.) (топография получена на основе профилометрирования щуповым прибором) с аналитическим описанием и сохранением естественной кривизны поверхности, а также трехмерную геометрическую модель аэрогидродинамической поверхности сложной формы, которая представляет собой гладкую сшивку модулей, имеющих также аналитическое представление.

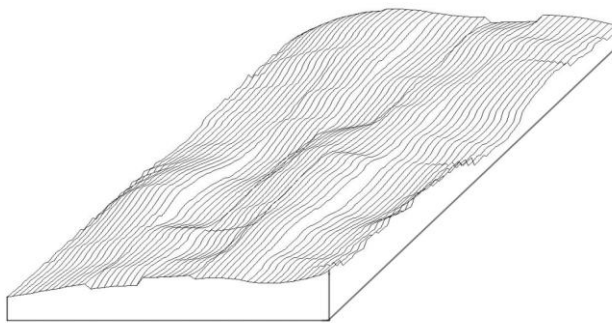


Рис. 1. Топография
микро рельефа образца сталь 50ХГА,
термостойкая после черновой
обработки. Площадка 1500х500 мкм

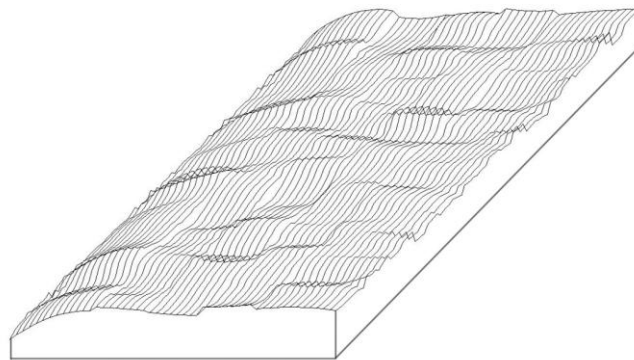


Рис. 2. Топография
микро рельефа образца сталь 50ХГА,
термостойкая после финишной
обработки. Площадка 1500х500 мкм

Для структурирования модели микро рельефа поверхности, зонд (панель, составленная из ПЗС-приборов зарядовой связи) кинематического блока установки имеет пять степеней свободы: три поступательные и две вращательные. Зонд совершает поступательное движение по рассчитанной для данной поверхности координатной сети и снимает карты профиля поверхностного слоя (профилограммы) в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Выводы. Системные комплексы неразрушающего контроля нового поколения над формированием топографии микро рельефа, разработаны для применения в структурировании на основе модульно-геометрического подхода топографии микро рельефа, а также геометрии (внешней, внутренней) поверхности сложной формы.

Разработана оптическая схема профилографа, сканирующего голографическое изображение объекта в видимом интервале электромагнитных волн и позволяющего получить характеристики поверхности для структурирования ее трехмерной модели на основе модульно-геометрического подхода.

Список литературы

1. Белкин Е.А., Поярков В.Н. Профилографы нового поколения на основе голографии //Научное обозрение. 2015. № 12. С. 205-208.
2. Белкин Е.А., Поярков В.Н. Голографический профилограф пассивного контроля /Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: Сб. науч. тр. по матер. междунар. науч.-практ. конф. Ч. II. 31 августа 2013 г. М.: АР-Консалт, 2013. С. 33-35.
3. Belkin E.A., Poyarkov V.N. Inspection tools for control of microrelief formation process //Наука, образование, общество: современные вызовы и перспективы: Сб. науч. тр. по матер. междунар. науч.-практ. конф. В 4-х частях. Ч. II. 28 июня 2013 г. М.: АР-Консалт, 2013. С. 117-119.
4. Белкин Е.А., Поярков В.Н. Профилографы нового поколения /Materialy IX miedzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji. Wschodnie partnerstwo – 2013. 07 – 15 wrzesnia 2013 roku. Volume 31. Fizyka. Przemysl. Nauka I studia, 2013. С. 8-10.
5. Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Поярков В.Н. Приборы неразрушающего контроля нового поколения над процессом формированием топографии микрорельефа // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 4. С. 145-149.
6. Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Моделирование микрорельефа абразивного инструмента и поверхности детали. Монография. М.: Издательство «Машиностроение-1», 2004. 214 с.

**ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ
МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ**

Андрей Михайлович, студент СГТУ имени Гагарина Ю.А., Россия, г.Саратов

Лариса Геннадьевна Бокова, к.т.н., доцент СГТУ имени Гагарина Ю.А.,

Россия, г.Саратов, bokovalg@mail.ru

Петр Юрьевич Бочкарев, д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А.,

Россия, г.Саратов, bpy@sstu.ru

Аннотация. В статье предлагается подход к анализу производственной технологичности деталей применительно к условиям многономенклатурных механообрабатывающих систем. Представлена последовательность выполнения вычислительных процедур при оценке технологичности.

Ключевые слова: производственная технологичность, оценка технологичности деталей, многономенклатурные производственные системы, механообрабатывающее производство.

**EVALUATION PRODUCTION ARTICLE TECHNOLOGICAL
EFFECTIVENESS WITH THE SPECIAL CHARACTERISTIC OF HIGH-
MIX MANUFACTURING**

A. M. Trushechkin, L. G. Bokova, P.Yu. Bochkarev

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

Annotation. The paper proposes an approach to the analysis of industrial technological details in relation to the conditions of diversified machining systems. Presented sequence of computing procedures in evaluating manufacturability.

Keywords: production manufacturability evaluation technological details, diversified production systems, production machining.

Конкурентоспособность изделий машиностроения определяется обеспечением качества и снижением себестоимости их изготовления. Во многом это обеспечение зависит от координации работ на стадиях

конструкторской и технологической подготовки. Такая координация достигается оценкой спроектированных деталей на технологичность и от полноты и достоверности результатов такой оценки во многом зависит результативность выполняемых работ.

Повышение эффективности функционирования производственных систем в первую очередь определяются сроками и уровнем автоматизации технологической подготовки производства. Современные тенденции развития машиностроительного производства, в условиях частой сменяемости выпускаемой продукции, выдвигают на первый план задачу значительного сокращения сроков разработки технологических процессов, и повышения качества проектных решений. Выполнение этих задач возможно только при создании автоматизированных систем технологической подготовки производства, способных приспособлять процесс изготовления изделий к непрерывно изменяющимся производственным условиям и объектам проектирования. Представляя производственную систему как систему по изготовлению деталей, а технологию, как одну из ее подсистем, обеспечивающую создание алгоритма функционирования производственной системы, можно сделать вывод, что необходимо создание технологии, которая не вносила бы дополнительные ограничения, а была в максимальной степени адаптирована к производству и позволяла бы максимально реализовать возможности производственной системы. Основываясь на этом, в работах [1,2] сформулированы основные теоретические положения системы планирования технологических процессов механической обработки, которым должна отвечать методология создания технологических процессов в условиях многономенклатурных производственных систем.

Данный подход имеет принципиальные отличительные характеристики от известных систем технологической подготовки механообрабатывающих производств: полностью формализованы проектные процедуры технологической подготовки производства; проектирование технологических процессов ведется с учетом характера производства и возможностью

оперативной корректировки технологических процессов в зависимости от изменения производственной ситуации; технология изготовления деталей строится с учетом технологических процессов в производственной системе в рассматриваемый интервал времени.

Созданы модели и разработаны подсистемы, позволяющие в полностью автоматизировать проектные процедуры создания технологических процессов изготовления деталей на этапах формирования структуры и содержания технологических операций [3,4].

Однако выполнение технологической подготовки производства как этапа технической подготовки [5] невозможно без установления взаимосвязей с предшествующим этапом в логической последовательности создания продукции - конструкторской подготовки. Основой таких взаимосвязей является оценка технологичности изделий, которая обеспечивает наиболее полное использование конструкторско-технологических резервов для решения задач, связанных с повышением технико-экономических показателей изготовления и качества изделий с обеспечением заданных технических требований.

Технологичность конструкции для условий многономенклатурного характера производства необходимо рассматривать как комплексное решение задачи создания конструкции, обеспечивающей возможность использования всех особенностей технологических процессов во времени и пространстве, т.е. относя ее к определенным производственным заданиям и условиям. В рамках производственной системы одновременно производится обработка деталей различных наименований, и эффективность работы системы во многом определяется технологической совместимостью деталей, которая определяется как однотипностью средств технологического оснащения, так и возможностью рациональной реализации процессов изготовления деталей, связанных с ситуационной перестройкой технологических процессов на различных этапах.

Серьезное изменение подходов к организации технологического обеспечения производственных систем не может не отразиться на комплекте оценочных показателей технологичности изготавливаемых деталей. Технологичность детали зависит от реальных технологических возможностей оборудования в рамках рассматриваемой производственной системы, поэтому сформированная в рамках создания системы база данных, отражающая технологические возможности оборудования, позволяет провести анализ и дать количественную оценку соответствия между заданными техническими требованиями на изготовление и возможностями производственной системы. Так же появляется возможность проведения проверки конструктивных характеристик деталей на возможность их изготовления в рамках конкретной производственной системы с учетом технологических возможностей механообрабатывающего оборудования.

Определение уровня использования технического потенциала оборудования при изготовлении отдельных деталей и всей запланированной номенклатуры деталей должно быть совмещено с оценкой комплекта изготавливаемых деталей по показателю однородности по виду и конструктивным характеристикам поверхностей, как составляющих элементов деталей, и заключением о степени их унификации.

Оценка технологичности конструкции велась на основе показателей, учитывающих возможность многовариантной реализации технологических процессов в реальных производственных условиях. Т.е. показатели должны отражать вероятностный характер реального процесса изготовления деталей и представлять возможность определить предельные значения технологичности.

Методика оценки технологичности деталей строится не для каждой отдельной детали, а для всей номенклатуры деталей, обработка которых происходит в рассматриваемый интервал времени в условиях конкретной производственной системы, с прогнозированием технико-экономических показателей изготовления, с целью выработки предложений по

формированию рационального комплекта деталей для сформировавшихся реальных производственных условий.

Основываясь на выше представленных требованиях по совершенствованию оценки технологичности деталей в рамках создания системы планирования многономенклатурных технологических процессов, предлагается структурная схема вычислительных процедур, увязанных с функциональными возможностями конкретной производственной системы и технико-экономическими характеристиками ее функционирования.

При анализе технологичности важным фактором, наряду с полнотой учета влияния конструктивных особенностей деталей на технологические аспекты их изготовления в условиях конкретной производственной системы, является упорядочивание и обоснование сопоставления критериев, используемых при ее количественной оценке. Производственная технологичность деталей обуславливает эффект при технологической подготовки производства, а также в процессе производства и контроля качества изделия. Таким образом. В качестве единого критерия технологичности конструкции целесообразнее всего использовать ее экономическую целесообразность при заданных номенклатуре, объемах изготовления и условиях производства.

В представленной последовательности оценки производственной технологичности деталей вычислительные процедуры разделены по функциональным задачам на две группы. В задачу первых входит отсев деталей, изготовление которых невозможно в условиях данной производственной системы с установлением конструктивно-технологических причин. В задачу вторых входит технико-экономическое заключение о соответствии комплекта обрабатываемых деталей возможностям конкретной производственной системы.

Проведенные исследования позволили предложить и обосновать комплект, дополнительных к традиционно используемым, критериев для оценки технологичности деталей на этапе их производства в общем

жизненном цикле изделий, и установить взаимосвязи между этими критериями и эффективностью функционирования механообрабатывающих систем в конкретных производственных условиях.

Литература

1. Бочкарев П. Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки/ П. Ю. Бочкарев// «Технология машиностроения», № 1, 2002 г. С. 10-14.
2. Митин С. Г. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве/ П. Ю. Бочкарев, С. Г. Митин// «Инновационная деятельность», № 4, 2013 г. С. 36-41.
3. Митин С. Г. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем/ П. Ю. Бочкарев, С. Г. Митин//«Научные технологии в машиностроении», № 11(4), 2014 г. С. 44-47.
4. Митин С. Г. Формирование методического обеспечения автоматизированной подсистемы проектирования операций фрезерной обработки/ С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев// «Научные технологии в машиностроении», № 1, 2012 г. С. 32-39.
5. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения: учебное пособие/ М. М. Кане// Москва: Машиностроение, 2010г. – 416 с.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СИЛОВЫХ
ГИДРОЦИЛИНДРОВ НА ОСНОВЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОЙ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Вячеслав Викторович Максаров, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург, e-mail: maks78.54@mail.ru, Дмитрий

Александрович Осминко, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург, e-mail: dart_main@mail.ru, тел. (812) 328 89 36

Аннотация: Основным видом отказов в системе силовых гидроцилиндров является нарушение герметичности и наличие протечек. Причины появления протечек в процессе эксплуатации напрямую связаны с точностью обработки внутренних поверхностей гидроцилиндра, а также наружных поверхностей штока и поршня, от состояния которых зависит ресурс работы оборудования. Одним из эффективных способов обеспечения устойчивости и повышения точности изготовления прецизионных поверхностей силовых гидроцилиндров является использование виброустойчивой инструментальной системы, состоящей из так называемых демпфирующих элементов. Преимуществами гашения колебаний с помощью таких инструментов является простота реализации и независимая эффективность в широком диапазоне режимов резания.

Ключевые слова: точность изготовления, шероховатость поверхности, силовые гидроцилиндры, виброустойчивый инструмент, инструментальная система, гашение колебаний, анизотропия, виброперемещение.

К силовым гидроцилиндрам предъявляются жесткие технические требования как по качеству их изготовления, так и по надежности эксплуатации. Внутренние поверхности гидроцилиндра, а также наружные поверхности штока и поршня являются рабочими, и их состояние оказывает решающее влияние на ресурс работы соединений. Основным видом отказов является нарушение герметичности и протечка силовых гидроцилиндров. В связи с этим является важным совершенствование технологии изготовления прецизионных поверхностей силовых гидроцилиндров. Качество изготовления гидроцилиндров зависит от многих факторов, это прежде всего

жесткость технологической системы, демпфирующие способности элементов системы, прочности и пластичности обрабатываемого материала; вида обработки; режимов резания и т.д. Любое случайное возмущение в технологической системе, вызванное врезанием или отталкиванием режущего инструмента, неравномерностью припуска, неоднородностью обрабатываемого материала, биением заготовки или инструмента, приводит к неизбежному возникновению собственных затухающих колебаний, которые ухудшают точность и шероховатость поверхности элементов гидроцилиндра.

Вибрации, возникающие в процессе механической обработки, существенно затрудняют эксплуатацию технологического оборудования, работающего в автоматизированном цикле, являются причиной преждевременного износа инструмента, аварий станков и приспособлений. Динамическая устойчивость технологической системы и снижение уровня вибраций, возникающих в процессе резания, являются залогом стабильности стружкообразования, что особенно важно при автоматизации технологического процесса. Таким образом, задача обеспечения устойчивости технологической системы за счет снижения уровня автоколебаний является одной из важнейших в области лезвийной обработки, особенно при чистовой обработке изделий на автоматических станках и станках с ЧПУ.

Одним из наиболее эффективных способов, позволяющих обеспечивать устойчивость парциальной технологической подсистемы «инструмент» при чистовой обработке тел вращения, является создание системы демпфирующего инструмента, эффект в которой достигается сочетанием принципа многослойности с использованием анизотропных свойства проката. Эксплуатация такой системы инструмента на операциях точения позволяет снижать высокочастотные колебания, возникающие в процессе резания, за счет упорядоченной разориентации текстуры анизотропных пластин сборной многослойной державки, позволяющей эффективно рассеивать энергию колебательной волны на границе перехода между

пластинами державки. Этот метод дает возможность существенно повысить стойкость режущей кромки инструмента и расширить технологические возможности выбора эффективных режимов резания, обеспечивающих выполнение требований по размерной и геометрической точности, качеству обрабатываемой поверхности.

Метод создания системы демпфирующего инструмента основан на принципе многослойности, предполагает использование анизотропии свойств пластин державки, создающейся в результате обработки давлением. Пластическая деформация сталей горячей прокаткой приводит к изменению направления волокон макроструктуры, структурных составляющих и включений вдоль ее направления, наряду с кристаллографической текстурой образуется механическая текстура деформации. Державку режущего инструмента предлагается изготавливать из пакета пластин, контактирующих между собой по плоскостям, параллельным опорной поверхности державки (рис.1). Эффективность и качество обработки рабочих поверхностей штока при тонкой лезвийной обработке существенно зависят от динамического поведения технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь». Таким образом, задача обеспечения устойчивости технологической системы за счет снижения уровня колебаний является одной из важнейших в области изготовления прецизионных поверхностей силовых гидроцилиндров на основе виброустойчивой инструментальной системы.

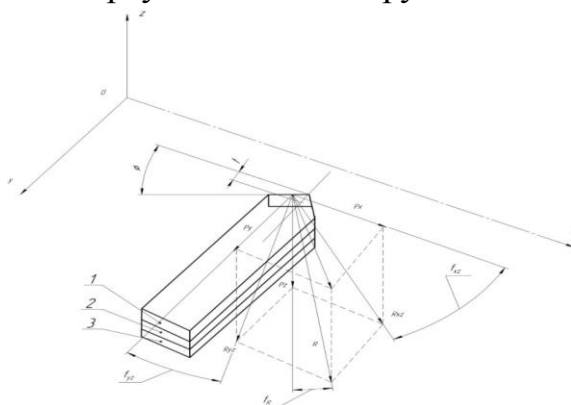


Рис.1. Схема резания и направление сил резания, по которым ориентируется текстура пластин державки проходного резца: x, y, z – направление координат на станке; ϕ – главный угол в плане; t – глубина резания; P_x – осевая сила резания; P_y – радиальная сила резания; P_z – тангенциальная сила резания; R, R_{xz}, R_{yz} – равнодействующие силы резания под углом f_R, f_{xz}, f_{yz}

Державку режущего инструмента для расточки глубокого отверстия (рис. 2) изготавливают из склеенных вертикально между собой пакетов пластин. Каждую из этих пластин вырезают из листового проката, при этом пластинки 1 и 3 имеют продольную ориентировку относительно направления прокатки, а пластинка 2 - поперечную. Для достижения наибольшего демпфирующего эффекта раз ориентация текстуры двух соседних пластин должна быть максимальной, тогда колебательная волна при переходе границы раздела пластин меняет своё направление, в результате чего происходит рассеивание энергии колебаний. На рис. 2 изображена схема резания и направление сил резания, по которым ориентируется текстура пластин державки расточного резца. На заготовке обозначены отклонения геометрических параметров: отклонение размера ΔD ; отклонение формы $\Delta \Phi$; отклонение, имеющий характер волнистости; шероховатость поверхности. Все пластины обладают различными физико-механическими, в том числе демпфирующими, свойствами относительно действия нагружающих державку составляющих силы резания P_x , P_y , P_z . Под действием силы резания в верхних слоях державки возникают преимущественно максимальные растягивающие напряжения σ_p (см. рис. 2, пластина 1), а в нижних опорных – сжимающие напряжения $\sigma_{сж}$ (см. рис. 2, пластина 3).

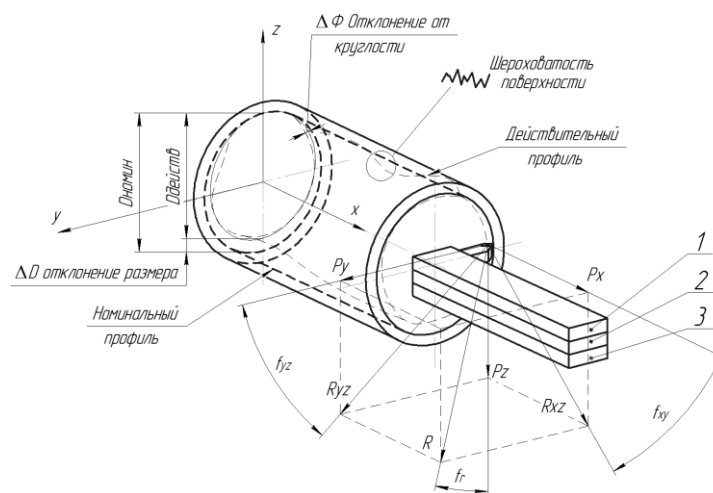


Рис. 2. Схема резания и сил резания: x, y, z – направление координат на станке;
 P_x – осевая сила резания; P_y – радиальная сила резания; P_z – тангенсальная сила резания;
 R, R_{xz}, R_{yz} – равнодействующие силы резания под углом f_r, f_{xz}, f_{yz}

При разработке новой технологии так же, как и в типовой, используются три

операции, но чистовую и размерно-чистовую обработку проводят лезвийным токарным инструментом, оснащенным керамической пластинкой.

Инструментальное оснащение, основанное на принципе многослойной державки позволяет использовать стандартные посадочные места в инструментальных магазинах токарных и обрабатывающих центрах, обеспечивать эффективное динамическое гашение колебаний за счет большой диссипативной силы сопротивления материала державки, что улучшает качество и точность изготовления прецизионных поверхностей силовых гидроцилиндров.

V.V. Maksarov, D.A. Osminko

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURING OF PRECISION SURFACE POWER CYLINDERS ON THE BASIS OF VIBRATION OF THE TOOL SYSTEM

*Maksarov Vyacheslav V., professor at the department of mechanical engineering,
e-mail: maks78.54@mail.ru,*

*Osminko Dmitriy A., postgraduate at the department of mechanical engineering,
e-mail: dart_main@mail.ru,*

St. Petersburg Mining University, Russia, phone (812) 328 89 36

Abstract: The main mode of failure in the system power cylinders is leaking and leaks. Causes of leaks in the process of operation directly associated with the precision machining of internal surfaces of the cylinder and the outer surfaces of the rod and piston. The quality of the processing of these surfaces determines the life of the equipment. One of the most effective ways to ensure sustainability and improve the accuracy of precision surfaces of the power cylinders is the use of a vibration tool system. The benefits of damping using such tools is the ease of use and independent efficacy in a wide range of cutting conditions.

Keywords: precision manufacturing, hydraulic power cylinders, tool vibration, tool system, vibration damping, anisotropy, vibration displacement.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**СОВРЕМЕННЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В
МАШИНОСТРОЕНИИ (МТЕТ-2016)**

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Лезвийные и абразивные методы обработки заготовок	Стр.
Юрьев В. Г., Зубарев Ю. М. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛЕНТОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ И ИХ ОСОБЕННОСТИ.....	5
Жуков Е.И., Хрусталева И.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	15
Петухов Г.Д., Макаров В.Ф. РАСЧЕТ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛ РЕЗАНИЯ НА ЗАМОК ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОТЯГИВАНИИ.....	20
Носенко В. А., Тышкевич В. Н., Саразов А.В., Орлов С. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ ПРИ ЗАКРЕПЛЕНИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.....	26
Мелентьев Р.Ю. MULTI-GRAINED ABRASIVE DRILL BIT.....	31
Мелентьев Р.Ю. SELF-SHARPENED PROFILE OF THE CORE DRILL.....	37
Маслов А.Р. ВЛИЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ (DLC) ПОКРЫТИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ БЕЗ СОЖАВИАЦИОННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	43
Макаров В.Ф., Угринов В.Ю., Горбунов А.С., Ворожцова Н.А. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ ТРУБ АВИАЦИОННЫХ ХВОСТОВЫХ ТРАНСМИСССИЙ ВЕРТОЛЕТОВ.....	49
Макаров В.Ф., Никитин С.П., Норин А. О., Туранский Р.А. РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ БАЗОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК НА МНОГООСЕВОМ СТАНКЕ С ЧПУ.....	54
Макаров В.Ф., Григорьева А.В. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ОХЛАЖДАЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ В ЛОПАТКАХ ТУРБИН С ТЕПЛОЗАЩИТНЫМ КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ НА СТАНКЕ С ЧПУ.....	61
Ларшин В.П., Лищенко Н.В. ОПТИМИЗАЦИЯ ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИПУСКА НА ЗАГОТОВКЕ ПЕРЕД ЗУБОШЛИФОВАНИЕМ.....	83
Кожевников С.И., Макаров В.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРАТЕГИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРЕСС-ФОРМ.....	89
Зубарев Ю.М., Алейникова М.А. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШПИНДЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ.....	93
Зубарев Ю.М., Круглов А.И. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ПРОЦЕССОВ ИОННО-ВАКУУМНОЙ МОДИФИКАЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ.....	103

Раздел 2. Инженерия высококачественных поверхностей и кромок	112
<i>Мешикас А.Е., Макаров В.Ф., Ширинкин В.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ ПОВЫСИТЬ КАЧЕСТВО МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ФРЕЗЕРОВАНИЯ.....	113
<i>Юрьев В. Г., Никитин В. А., Петров В. М.</i> ВЛИЯНИЕ ФУЛЛЕРОИДНЫХ ДИСПЕРСИЙ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКОВ.....	124
<i>Ширинкин В.В., Макаров В.Ф., Мешикас А.Е.</i> АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	132
<i>Чижики С.А., Хейфец М.Л.</i> АДДИТИВНЫЕ СИНЕРГОТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА ИЗДЕЛИЙ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ.....	137
<i>Витязь П.А., Хейфец М.Л., Сенють В.Т.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ЛИТЬЕМ ГРАДИЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	146
<i>Сырицкий А.Б.</i> МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТОКАРНОГО ИНСТРУМЕНТА НА БАЗЕ ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА.....	152
<i>Рузанкина Ю.С., Васильев О.С., Парфенов В.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	157
<i>Тумакова Е.В., Комшин А.С.</i> ВНЕДРЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИЕ.....	161
<i>Козлов А.А., Козлов А.М.</i> МАРКИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ С УПРУГИМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ.....	166
<i>Васильев О.С., Рузанкина Ю.С.</i> ЛАЗЕРНАЯ МИКРО ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА.....	173
Раздел 3. Повышение эффективности машиностроительного производства	179
<i>Гасюк Д.П., Касяненко Е.О.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБОРОННОГО ЗАКАЗА В УСЛОВИЯХ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	180
<i>Попов В.Ю., Янюшкин А.С.</i> К ВОПРОСУ О ЗАСАЛИВАНИИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ.....	190
<i>Рычков Д.А., Янюшкин А.С.</i> МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ СВЯЗКЕ.....	196

Максаров В.В. ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	202
Кристалъ М.Г. АВТОМАТИЧЕСКАЯ РОТАЦИОННАЯ СБОРКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ.....	207
Кожина Т. Д. НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ....	212
Зарубин Д.А., Хурамин М.М., Сергеев С.Н., Павельчук К.Е., Кириллов Б.М. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ КОНТРОЛИРУЕМОГО СТРУЙНОГО ПОЛИВА.....	228
Назарьев А.В., Бочкарёв П.Ю. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ.....	233
Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ В МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ.....	239
Годлевский В.А., Железнов А.Г., Сандлер В. А., Смирнова А.И., Усольцева Н.В., Березина Е.В. ДИАГНОСТИКА СОТС ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ТРИБОМЕТРИИ.....	245
Белкин Е.А., Поярков В.Н., Степанов Ю.С. УСТАНОВКА ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НАД ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА.....	251
Трушечкин А.М., Бокова Л.Г., Бочкарев П.Ю. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ.....	258
Максаров В.В., Осминко Д.А. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СИЛОВЫХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ НА ОСНОВЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.....	264

СБОРНИК ТРУДОВ V МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Санкт-Петербург, 6-8 октября 2016 г.

Статьи публикуются в авторской редакции

Сборник включен в базу данных Российского индекса
научного цитирования (РИНЦ) Научной электронной
библиотеки <http://elibrary.ru>