

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт Машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

**Попов Александр
Александрович**

**Повышение износостойкости инструмента при механической обработке
труднообрабатываемых заготовок**

Направление подготовки: 15.06.01 Машиностроение

Код и наименование

Направленность: 15.06.01_02 Трение и износ в машинах

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Попов А.А.
Научный руководитель: профессор,
д.т.н., Скотникова М.А.

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШ Машиностроения
Института ИММиТ федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ Машиностроения: – *Любомудров Сергей
Александрович – к.т.н.,
доцент*

Научный руководитель: – *Скотникова Маргарита
Александровна – д.т.н.,
профессор*

Рецензент: – *Козырев Юрий Петрович –
к.т.н., ст.н.с. ФГБУН Институт
проблем машиноведения РАН,
ст.н.с.*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Увеличение скорости механической обработки металлических заготовок является одним из направлений повышения производительности труда и качества получаемых поверхностей. При этом возникает проблема увеличения износа инструмента с увеличением скорости резания сверх определенного уровня. Существует гипотеза о наличии здесь связи с изменением степени локализации пластической деформации в металле заготовки вблизи поверхности инструмента [1-3].

Цель работы. Изучение закономерностей возникновения и релаксации контактных напряжений в процессе вдавливания инструмента (индентора) в поверхность материалов обрабатываемых заготовок с ГПУ, ОЦК и ГЦК - решеткой с помощью инструментального индентирования (погружения индентора на разную глубину) и установлении природы локализации пластической деформации вблизи его поверхности.

Задачи исследования:

1. Анализ износа инструмента при одинаковой скорости механической обработки сплавов, но с разным (ГПУ, ОЦК и ГЦК) их кристаллическим строением.
2. Анализ износа инструмента при механической обработке материалов с увеличением скорости резания.
3. Исследование вязкопластических свойств исследованных материалов с увеличением температуры нагрева.
4. Установить природу разной степени обрабатываемости сплавов на основе алюминия, стали, титана.
5. С помощью метода инструментального индентирования на промышленных заготовках из сплавов АМц, Ст45, ХВГ, ВТ23 на нано-, микро- и макроуровне получить комплекс свойств поверхности: E_{IT} , H_{IT} , H_{IT}/E_{IT} , R_{IT} , W_{plast} , W_{elast} , Π_{IT} от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г.
6. Произвести оценку склонности исследованных сплавов к деформационному упрочнению и к релаксационному разупрочнению.
7. Исследование и расчет для сплавов АМц, Ст45, ХВГ, ВТ23 контактных напряжений ($\tau_{конт}$) по сравнению с сопротивлением металла на сдвиг ($\tau_{мет}$) и их отношения ($\tau_{конт} / \tau_{мет}$)

Научная новизна

1. Установлена природа разной степени обрабатываемости сплавов на основе алюминия, стали, титана.
2. В сплаве титана ВТ23, наряду с деформационным упрочнением, имело место периодическое релаксационное разупрочнение. Диссипативные модуляции структуры и микротвердости в сплаве ВТ-23 могли явиться причиной снижения напряжений в зоне контакта с индентором (инструментом).

3. На примере сплавов АМц, Ст45, ХВГ, ВТ23 проведено исследование и расчет контактных напряжений ($\tau_{\text{конт}}$) по сравнению с сопротивлением металла на сдвиг ($\tau_{\text{мет}}$) и их отношения ($\tau_{\text{конт}} / \tau_{\text{мет}}$)

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработанная диаграмма видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии индентора и величины приложенных относительных контактных сдвиговых напряжений может быть использована для подбора режимов при поверхностной механической обработке заготовок.

2. На промышленных заготовках из сплавов АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23 на нано-, микро- и макроуровне получен комплекс свойств поверхностей с помощью метода инструментального индентирования: E_{IT} , H_{IT} , H_{IT}/E_{IT} , R_{IT} от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г. Полученные результаты могут быть использованы для разработки ТУ.

3. Можно полагать, что процесс стружкообразования при механической обработке будет облегчен вблизи сильных концентраторов напряжений, в материалах в которых релаксационные процессы заторможены, в условиях высоких скоростей, низких температур деформирования. Формируется упруго-напряженное состояние с высокими контактными напряжениями ($\tau_{\text{конт}} > 0,5 \tau_{\text{мет}}$) и перед резцом (индентором) протекает продольное пластическое оттеснение.

4. Для подготовки учебного пособия и курса лекций в магистратуре 15.04.01_14 по дисциплине «Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении»

Апробация работы

Результаты работы докладывались на:

1. Научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ ИММиТ». – СПб, **2015**.

2. 6-ой Международной научно-практической конференции. Современное машиностроение. Наука и образование MMESE-**2017**.

3. 17th Int. Symposium “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”, School of Engineering, Tallinn University of Technology, 15–20.01. 2018, Kuressaare, Estonia, **2018**.

4. Международной конференции «New Materials and Technologies in Mechanical Engineering», ИММиТ, 12 - 15 марта **2019**.

5. Международной конференции «Material Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry» (MS-SAMC-2019), ИММиТ, 20-21 ноября **2019**.

Публикации

Основные результаты исследований были опубликованы в 7 рецензируемых статьях, в том числе: в 4-х изданных в журналах, индексируемых в ВАК РФ, Scopus, Web of Science и в 3-х статьях в журналах, индексируемых в РИНЦ.

Представление научного доклада: основные положения

1. Постановка и решение задач исследования значительного износа инструмента при механической обработке титановых заготовок.

2. Разработка имитационного моделирования процесса контакта инструмента с заготовкой через метод инструментальное индентирования.
3. Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки в контактной зоне.
4. Проведение испытаний с помощью механической обработки заготовок из сплавов алюминия АМц, титана VT-23 и сталей 45, ХВГ с ГЦК, ГПУ и ОЦК – решеткой, соответственно.
5. Оценка износа инструмента ВК8 по мере увеличения скорости механической обработки.
6. Оценка значений инструментальной твердости (H_{IT}), модуля упругости (E_{IT}), их отношения (H_{IT} / E_{IT}) классической микротвёрдости H_{μ} , модуля Юнга E их отношения (H_{μ} / E).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В процессе стружкообразования резец, являясь макро-концентратором, формирует впереди себя волну пластической деформации и разрушение. Как было показано [1-3, 6], износ инструмента связывают с торможением локализации пластической деформации в зоне контакта с инструментом. Материалы, при обработке которых, возникает значительный (или не значительный) износ инструмента, относятся к классу труднообрабатываемых (или легкообрабатываемых) с коэффициентом обрабатываемости $K_m = 0,1 \dots 0,3$ (или $K_m = 0,9 \dots 1,0$), соответственно.

В процессе механической обработки, инструмент (индентор) при своем движении деформирует материал заготовки, формируя волну сжатия. Поэтому способ испытания металла на классическую микротвердость [4-6] а так же, с помощью инструментального индентирования [8-10] на нано- и микроуровне, является наиболее чувствительным локальным методом оценки свойств в поверхностном слое материала под действием сжимающих напряжений. Этот метод позволяет детально с высокой точностью произвести анализ изменения свойств материала в контактной зоне заготовки под действующим движущегося инструмента (индентора), который являясь концентратором, вызывает концентрацию напряжений и локализацию пластической деформации вблизи его поверхности [11-16].

1. Объектом исследования данной работы является резец (инструмент) для механической обработки металлических заготовок. Анализ причин значительного износа резца при больших скоростях механической обработки и особенно сплавов на основе титана с ГПУ-решеткой является темой работы.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Методика и материалы

Материалом для исследования являлись заготовки из сплава алюминия АМц, сталей 45, ХВГ и сплава титана VT-23 в отожженном состоянии. Их

химический состав, механические и эксплуатационные свойства представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Химический состав и эксплуатационные свойства исследованных сплавов

Марка сплава	Химический состав, вес. %	Характер и коэффициент, Км, обрабатываемости	
АМц	Al - 1,5Mn - 0,7Fe - 0,6Si - 0,2Cu - 0,1Zn	Легкая	1,0
Ст. 45	Fe - 0,45C - 0,25Ni - 0,25Cu - 0,2Cr - 0,6Mn - 0,3Si	Средняя	0,8
ХВГ	Fe - 1C - 1,5W - 1Cr - 1Mn - 0,3Si	Средняя	0,7
BT-23	Ti - 5Al - 5V - 2Mo - 1Cr - 0,5Fe	Трудная	0,25

Таблица 2.

Механические свойства исследованных сплавов

Марка сплава	Тип кристаллической решётки	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	ψ %	G МПа	E МПа
АМц	ГЦК	110	60	33	25	27600	70000
Ст. 45	ОЦК	610	360	10	20	78000	145000
ХВГ	ОЦК	725	375	25	38	77000	164000
BT-23	ГПУ	1100	925	14	47	43300	112000

Температурные зависимости исследованных материалов представлены на рис.1. Видно, что по сравнению с ХВГ, в сплаве BT23 интенсивное разупрочнение происходит уже при температуре деформации 500...600°C. Сплав на основе алюминия АМц обладает относительно более высокой термостойкостью.

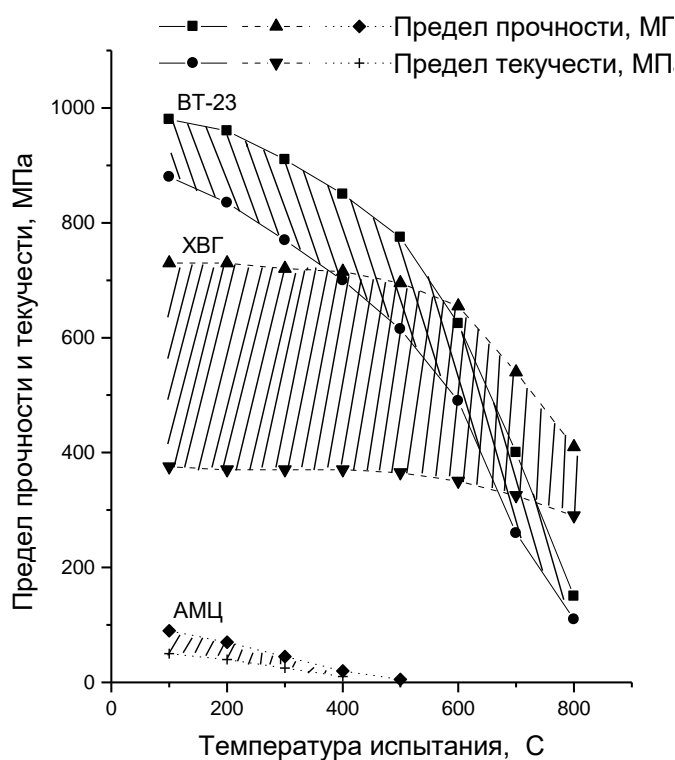


Рис. 1. Температурное разупрочнение (релаксация) сплавов АМц; ХВГ; BT-23

Механическая обработка этих материалов проводилась твердосплавным резцом ВК8 без смазки со скоростью подачи $S = 0,26$ мм/оборот и глубиной резания $t = 0,3$ мм, в диапазоне скоростей резания 2...275 м/мин, с коэффициентами обрабатываемости K_m равными 1,0; 0,8; 0,7; 0,25 и линейным износом инструмента 14, 25, 31, 365 мкм (при скорости 122 м/мин), соответственно (табл. 1). Геометрические параметры резца составляли углы: $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=15^\circ$; $\alpha=6^\circ$; $\gamma=12^\circ$.

На рис. 2 представлены схемы формирования зон контакта между инструментом и стружкой исследуемого материала: сливной (а); элементной (б); адиабатической (в).

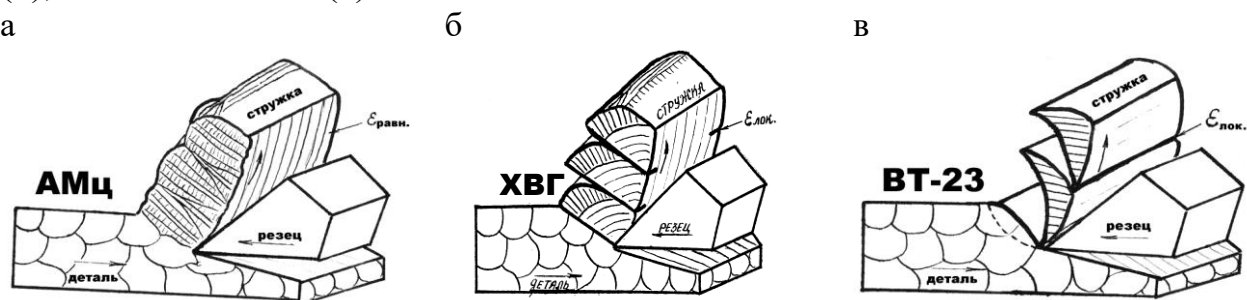


Рис. 2. Схема формирования стружки: сливной (равномерная пластическая деформация) (а); элементной (начало локализации деформации) (б); адиабатического сдвига (сильная локализация деформации) (в).

Для индентирования поверхности материала использовали как классические микротвердомеры ПМТ 3М (Россия), FUTURE-TECH (Япония), так и прибор для инструментального индентирования CSM Micro Indentation Tester (Швейцария).

2.2. Оценка классической микротвёрдости исследованных сплавов с помощью микротвердомеров ПМТ-3М и FUTURE-TECH

Измерения микротвердости проводились на микрошлифах, как в исходном состоянии, так и после механической обработки со скоростью 122 м/мин в продольной плоскости стружки с интервалом 50 мкм при нагрузке 50 г (табл. 3).

Как показали результаты, если в исходном состоянии сплав АМц, стали 45, ХВГ и сплав ВТ-23 имели микротвердость 928 ± 62 , 2050 ± 190 , 2411 ± 217 и 3903 ± 270 МПа, соответственно, то после деформации (лезвийной обработки) их микротвердость повышалась до 1182 ± 66 , 3550 ± 250 , 4424 ± 440 и 4421 ± 495 , соответственно. Относительно исходного состояния ($(H_{\mu} \text{ струж} - H_{\mu} \text{ исх}) / H_{\mu} \text{ струж}$, %), твёрдость сплавов повышалась на 21, 42, 46 и 12 %, соответственно.

После лезвийной обработке сплава титана ВТ-23, среднее значение микротвердости стружки изменялось мало, зато значительно возросла дисперсия ее измерений, по сравнению с исходным состоянием. В объеме металла стружки в долевом направлении, чередовались микрообъемы металла с микротвердостью выше и ниже среднего [17-21].

Таблица 3.

Результаты измерений микротвердости (H_{μ}), среднего квадратичного отклонения (Sc). Оценка способности к деформационному упрочнению сплавов.

Сплав	АМц	Ст45	ХВГ	ВТ23
Микротвердость сплава в исходном состоянии, МПа				
H_{μ} исх.	928	2050	2411	3903
Sc	62	190	217	270
Микротвердость стружки в долевом направлении, МПа				
H_{μ} струж.	1182	3550	4424	4421
Sc	66	250	440	495
Оценка способности сплава к деформационному упрочнению				
$(H_{\mu}$ струж – H_{μ} исх) / H_{μ} струж, %	21	42	46	12
H_{μ} исх / E	0,0133	0,0141	0,0147	0,0348
$(\sigma_B - \sigma_{0,2})$, МПа	50	250	350	175

Значение отношения твёрдости материала в исходном состоянии к его модулю упругости Юнга (H_{μ} / E) характеризует способность сплава к деформационному упрочнению. Как видно из таблицы 3, увеличение отношения (H_{μ} / E) происходит в направлении от АМц → Сталь 45 → ХВГ до ВТ23. Однако, релаксационное разупрочнение в сплавах может изменить этот порядок.

Известно, что о способности материала к равномерному деформационному упрочнению при растяжении можно судить и по разнице между пределом прочности и пределом текучести ($\sigma_B - \sigma_{0,2}$). Как видно из таблицы 3, увеличение этого отношения происходит в направлении от АМц → Сталь 45 до ХВГ. В труднообрабатываемом сплаве ВТ23 упрочнение было невелико, вероятно, наряду с деформационным упрочнением, в нём имело место периодическое релаксационное разупрочнение.

2.3. Оценка микротвёрдости исследованных сплавов с помощью инструментального индентирования на приборе CSM-Micro-Indentation Tester

Инструментальное индентирование проводили при непрерывном внедрении наконечника (алмазной пирамиды Виккерса) в образцы из исследуемых сплавов в соответствии с заданным законом увеличения нагрузки (F) от 10 до 1000 г. Индентор выдерживали в течение 30 сек, а затем отводили (разгружали) до полной потери контакта с образцом. В ходе всей процедуры индентирования, регистрировали значения нагрузки (F) и перемещения (h) индентора (рис.3, а).

Прослеживая во времени полный цикл нагружения до заданной величины и снятия нагрузки, устанавливали изменение свойств материала по глубине под действием индентора (концентратора): значения инструментальной твердости (H_{IT}), модуля упругости (E_{IT}), их отношения (H_{IT}/E_{IT}), глубины погружения индентора (h), скорости разгрузки (S) из точки достижения максимальной нагрузки на кривой, релаксации (R_{IT}).

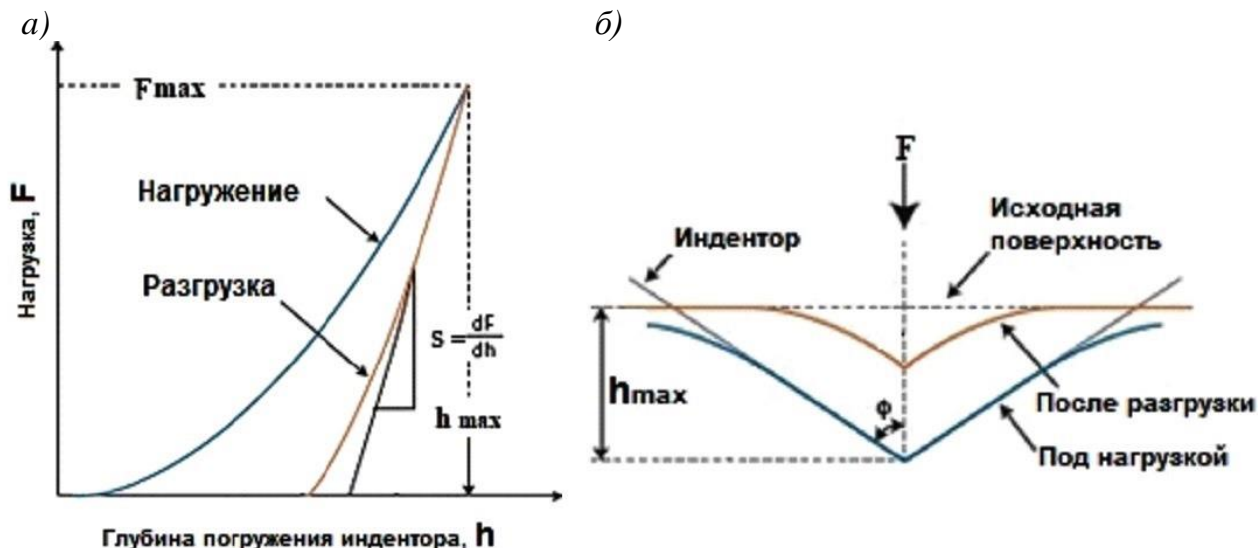


Рис. 3. Диаграмма индентирования: а - «Нагрузка - внедрение». б - Схема продольного сечения зоны индентирования

При снятии приложенной нагрузки (остановке инструмента) часть работы упругой деформации исчезает, что сопровождается выделением энергии и восстановлением микрорельефа поверхности (рис. 3, б)

На рис. 4 – б представлены результаты анализа свойств исследованных сплавов, полученные с помощью метода инструментального индентирования: E_{IT} , H_{IT} , H_{IT}/E_{IT} , R_{IT} от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г. Для сравнения, на те же графики нанесены значения модуля упругости Юнга E (табл. 2), средние значения микротвёрдости H_{μ} (табл. 3), отношение H_{μ} / E , полученные с помощью классического метода. Инструментальный модуль E_{IT} определяли по наклону касательной к кривой разгрузки на $F-h$ - диаграмме (рис.3, а).

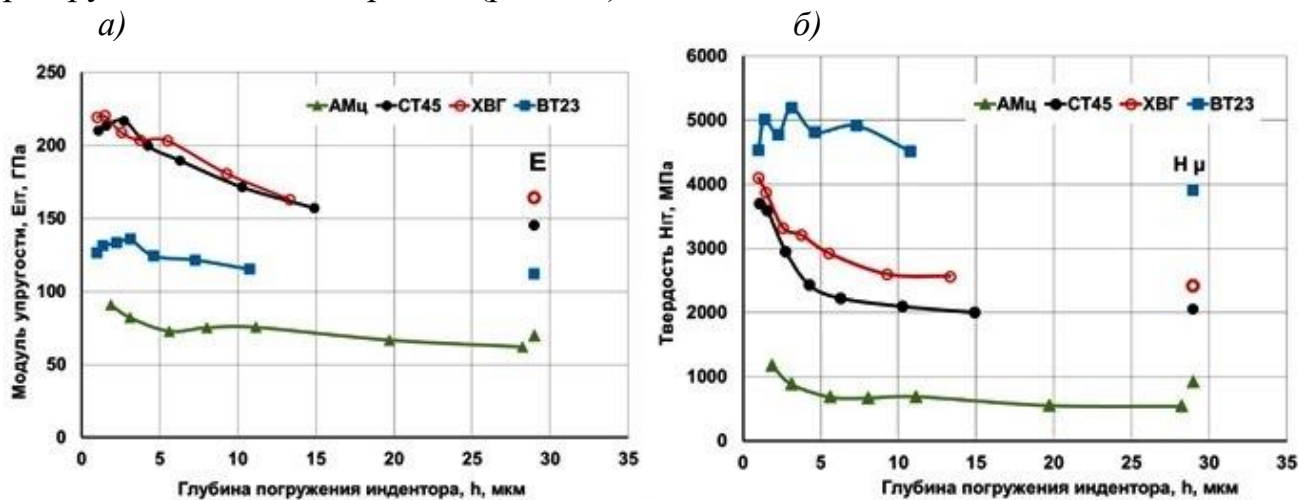


Рис. 4. Изменение свойств материалов, полученных с помощью инструментального индентирования и классического метода, от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г: а - модуль упругости Юнга, E ; б - микротвёрдость H_{μ}

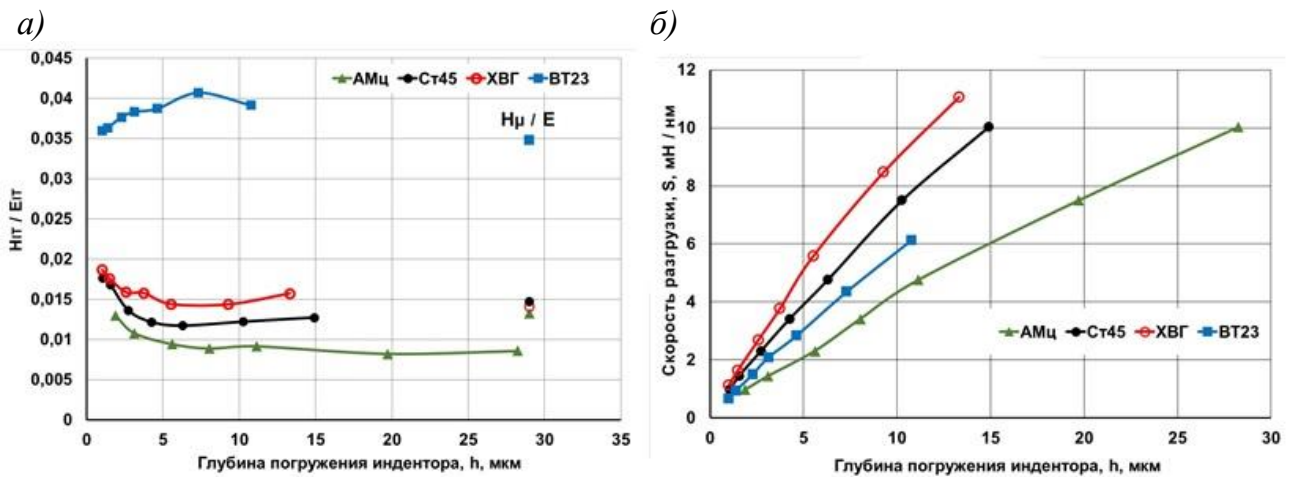


Рис. 5. Изменение свойств материалов, полученных с помощью инструментального индентирования и классического метода, от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г: *а* - отношение H_{IT} / E_{IT} ; *б* - скорость разгрузки S

Как видно из полученных результатов, с увеличением глубины погружения индентора до 30 микрон, значения инструментального модуля упругости E_{IT} (рис. 4, а) оказались близки к значениям модуля упругости Юнга E исследованных материалов (модуля продольной упругости). Инструментальная твёрдость H_{IT} сплавов (рис. 4, б), понижались, стремясь на глубине к значениям классической микротвёрдости H_{μ} исх. (см. табл. 3). В то же время отношение значений H_{IT} / E_{IT} увеличивалось (рис. 5, а), стремясь на глубине к классическому отношению H_{μ} исх. / E (см. табл. 3).

Значения отношения инструментальной твёрдости материала к его модулю упругости Юнга (H_{IT} / E_{IT}) характеризуют степень упруго-напряжённого состояния материала заготовки, его способность к деформационному упрочнению [10]. Исходя из рис. 5, а, склонность к деформационному упрочнению сплавов возрастает в направлении от АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23. В этом же направлении затрудняется продвижение индентора (инструмента) вглубь поверхности (рис. 5, а).

О наличии деформационного упрочнения сплава вблизи кончика индентора, вероятно, можно судить по скорости разгрузки (S) из точки достижения максимальной нагрузки на диаграмме индентирования (рис. 3, а). На рис. 5, б представлены графики скорости разгрузки S от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г. Чем больше деформационное упрочнение, тем должна быть больше скорость разгрузки S . Однако, исходя из рис. 5, б, склонность к деформационному упрочнению сплавов возрастала в направлении от АМц \rightarrow Ст45 до ХВГ. В труднообрабатываемом сплаве ВТ23 скорость разгрузки S была невелика, рис. 5, б, вероятно, наряду с деформационным упрочнением, в нём имело место релаксационное разупрочнение (рис. 6).

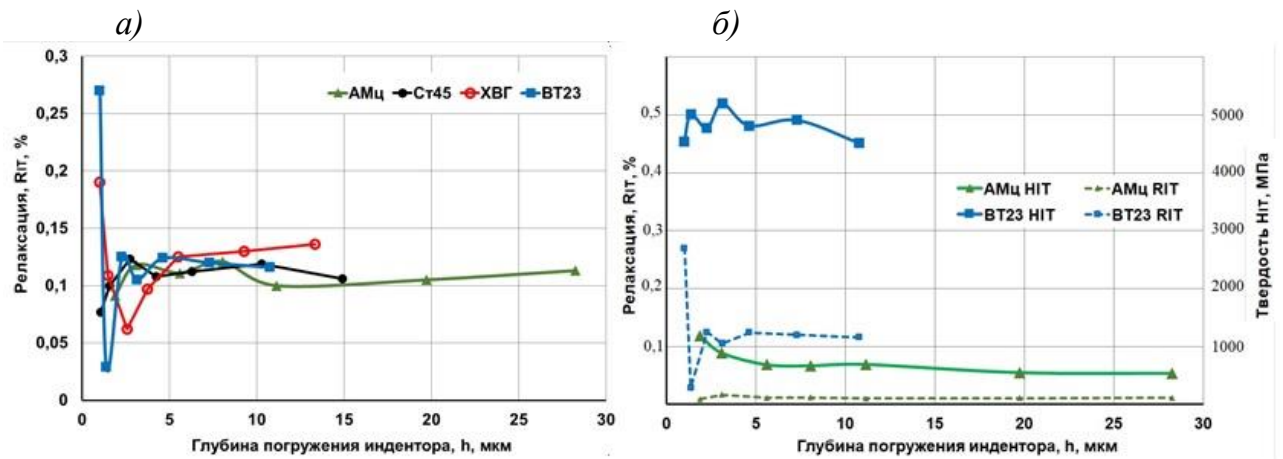


Рис. 6. Изменение свойств материалов, полученных с помощью инструментального индентирования от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г:
а - релаксация R_{IT} ; *б* - инструментальная твердость H_{IT} и релаксация R_{IT}

С помощью метода инструментального индентирования были изучены релаксационные способности всех исследованных сплавов (рис. 6, а). Оказалось, что труднообрабатываемый сплав ВТ23 обладает повышенной релаксационной способностью. В поверхностных слоях заготовки на глубине 1,015 - 2,278 мкм была установлена корреляция между чередованием процессов упрочнения (повышением микротвёрдости на 477,80 - 243,75 МПа) и релаксационного разупрочнения на 0,141 - 0,096 % с шагом 0,368 - 0,896 мкм (рис. 6, б).

Таким образом, при погружении индентора (инструмента) в труднообрабатываемый сплав ВТ23, наряду с деформационным упрочнением, имело место интенсивное периодическое релаксационное разупрочнение.

2.4. Влияние свойств исследованных сплавов обрабатываемых заготовок на проникновение и износ инструмента (индентора) при механической обработке и индентировании

Можно полагать, что в процессе стружкообразования резец, являясь макро-концентратором, формирует впереди себя волну пластической деформации и разрушения. Как было показано ранее [1, 3, 6], износ инструмента связывают с локализацией пластической деформации в металле в зоне контакта с инструментом. Материалы, при обработке которых, возникает значительный (не значительный) износ инструмента, относятся к классу труднообрабатываемых (легкообрабатываемых) с коэффициентом обрабатываемости $K_m = 0,1 \dots 0,3$ ($K_m = 0,9 \dots 1,0$), соответственно. По мере возрастания труднообрабатываемости, исследованные сплавы располагаются в направлении от АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23.

На рис. 7 представлены экспериментальные зависимости нарастания линейного износа инструмента с увеличением скорости механической обработки исследованных сплавов. При обработке сталей ХВГ и Ст45, сериальные кривые износа имели явные точки перегиба при скоростях резания 165 и 195 м/мин, соответственно. После чего интенсивность износа

инструмента значительно возростала. При обработке сплавов АМц и ВТ23, износ инструмента нарастал равномерно, без перегиба, с малой и большой интенсивностью износа, соответственно.

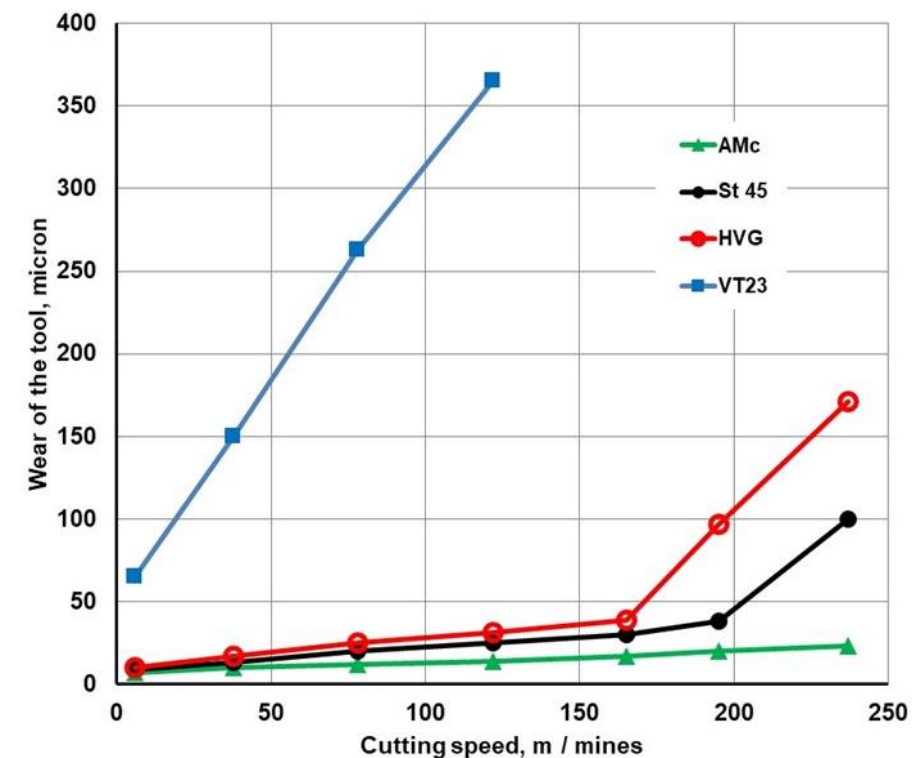


Рис. 7. Нарастание линейного износа инструмента с увеличением скорости лезвийной обработки исследованных сплавов.

Согласно графикам, линейный износ инструмента при обработке сплавов АМц, Ст.45, ХВГ и ВТ23 со скоростью 122 м/мин составил 14, 25, 31, 365 мкм, соответственно (см. табл. 4).

Наличие точек перегиба на графиках изменения линейного износа инструмента (рис. 7) можно объяснить следующим образом. В процессе обработки металла резанием, основным путем диссипации энергии является превращение механической энергии в тепловую, причем тепловыделение возрастает с увеличением степени и скорости деформации. Это тепло распределяется между стружкой, деталью, резцом и окружающей средой.

При малых скоростях резания основное тепловыделение происходит в детали, следовательно, в этом случае стружкообразование происходит при относительно низких температурах.

С увеличением скорости резания тепло перераспределяется между указанными составляющими и приводит к локализации его, прежде всего в стружке и в зоне ее контакта с резцом (рис. 8).

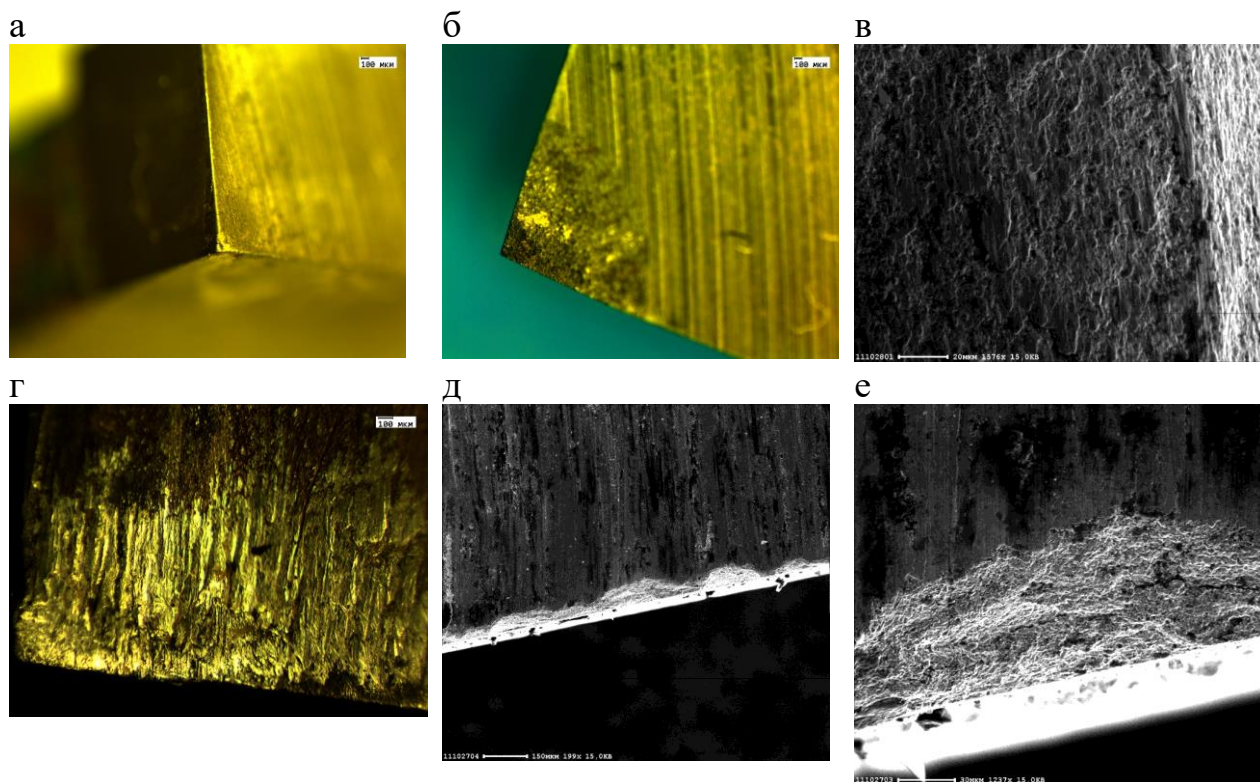


Рис. 8. Внешний вид поверхности лезвийной кромки инструмента на начальной (а,б,в) и конечной (г,д,е) стадиях изнашивания.

В этом случае стружкообразование происходит при относительно высоких температурах в условиях повышенной релаксации контактных напряжений.

2.5. Построение диаграммы видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии индентора и величины контактного напряжения

Можно полагать, что в процессе стружкообразования резец, являясь макро-концентратором, формирует впереди себя волну пластической деформации и разрушения. Известно [12], что размер зоны пластической деформации (ΔL) в устье трещины зависит от размаха коэффициента интенсивности напряжений (ΔK), определяющего поле упругих напряжений в окрестностях распространяющейся трещины и прочности обрабатываемого материала согласно формуле:

$$\Delta L = \Delta K^2 / 12\pi \cdot \sigma_{0,2}^2$$

Количественной оценкой предельного сопротивления металла распространению трещины является вязкость разрушения (K_{IC}). Для исследованных сплавов значения вязкости разрушения и расчетного размера зоны пластической деформации (ΔL) при комнатной температуре представлены в таблице 4. Видно, что в сплаве АМц размер зоны ΔL велик, что согласуется с известной легкостью лезвийной обработки сплавов на основе алюминия.

В направлении от алюминия к титану, имеет место значительное увеличение температуры плавления ($T_{пл}$), модуля упругости (E), удельного электросопротивления (ρ), теплопроводности (λ), коэффициента линейного расширения (α) и увеличение отношения величин последних (α/λ).

Таблица 4.

Механические и теплофизические свойства исследованных сплавов

Марка сплава	K_{1C} МПа·м ^{1/2}	ΔL мкм	$T_{пл}$, °C	λ , Вт/(м·К)	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	ρ 10 ⁻⁸ , ом·м	α/λ	K_M
АМц	20	2949	660	160	23,9	2,5	0,15	1,0
Ст. 45	27	1493	1535	49	11	8,6	0,22	0,8
ХВГ	43	349	1600	38	10	8,6	0,26	0,7
ВТ-23	144	643	1668	5	8,0	42	1,60	0,25

Таким образом, размер зоны пластической деформации и период локализации деформации при лезвийной обработке материала, будут возрастать с увеличением размаха коэффициента интенсивности напряжений (ΔK). Процесс стружкообразования будет облегчен вблизи сильных концентраторов перенапряжений, при увеличении периода локализации деформации в условиях торможения релаксационных процессов, то есть с увеличением скорости и снижения температуры деформирования.

В данной работе были изучены условия продольного и поперечного оттеснения металла, сопровождающие микровдавливание индентором или царапание резцом в зависимости от приложенных контактных напряжений, геометрии инструмента и прочности материала. Построена диаграмма видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии инструмента и величины приложенных контактных сдвиговых напряжений, рис. 9.

В качестве параметра, характеризующего геометрию индентора, было выбрано отношение глубины проникновения индентора h к радиусу закругления индентора R и синусу переднего угла γ , то есть, параметр $(h / R \sin \gamma)$, [4]. Фактические контактные сдвиговые напряжения обрабатываемого материала рассчитывались согласно соотношению:

$$\tau_{\text{конт}} = \alpha G b \rho^{1/2},$$

где α - константа, приблизительно равная 0.3...0.5, G - модуль сдвига, b - вектор Бюргера, ρ - плотность дислокаций.

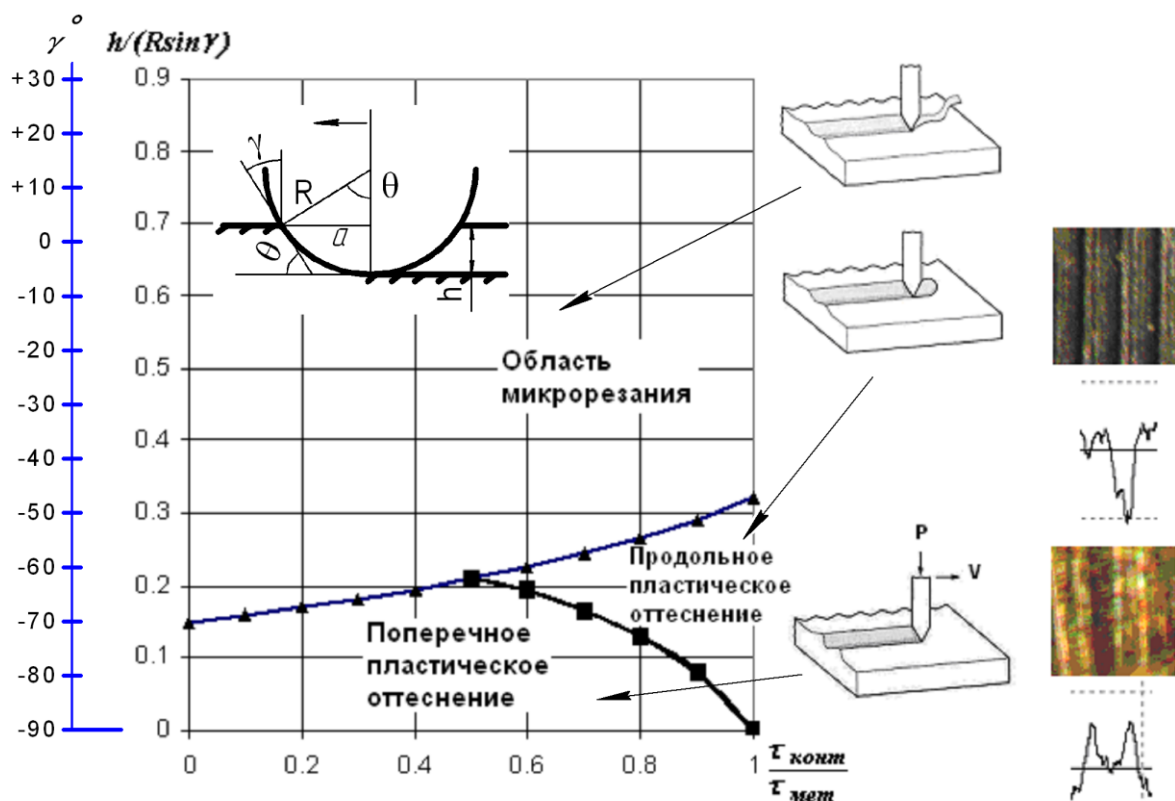


Рис. 9. Диаграмма видов контактного взаимодействия материалов в зависимости от геометрии индентора и величины приложенных относительных контактных сдвиговых напряжений

В качестве относительного контактного сдвигового напряжения принималось отношение фактического контактного сдвигового напряжения к предельному сопротивлению материала заготовки на сдвиг ($\tau_{мет}$), то есть параметр ($\tau_{конт} / \tau_{мет}$), рис. 9.

Появление навалов по краям отпечатка или риски, образующихся в процессе вдавливания или царапания, свидетельствовало о протекании *поперечной пластической деформации* относительно направления движения кромки инструмента, рис. 9.

Отсутствие навалов по краям отпечатка или риски, уплотнение, образование валика из материала впереди движущейся кромки инструмента свидетельствовало о протекании *продольной пластической деформации*, рис. 9.

Показано, что поперечное и продольное пластическое оттеснение наблюдаются при относительно низких и высоких контактных напряжениях, соответственно.

Анализ поверхностей, полученных после механической обработки, заготовок с помощью оптической, электронной микроскопии и профилометрии, выявил 2 вида бороздок.

При относительно низких контактных напряжениях ($\tau_{конт.} \leq 0,5 \tau_{мет.}$) – формировались бороздки с навалами – как результат поперечного пластического оттеснения металла относительно направления сдвига.

При относительно высоких контактных напряжениях ($\tau_{\text{конт.}} \geq 0,5 \tau_{\text{мет.}}$) – формировались бороздки без навалов – как результат продольного пластического оттеснения металла относительно направления сдвига.

При передних углах и контактных напряжениях свыше некоторых критических значений, поперечное или продольное пластическое оттеснение сменялись микрорезанием и формированием микростружки, рис. 9.

Таким образом, было показано, что пластическое оттеснение, сопровождающее вдавливание индентором или царапание резцом в контактной зоне пары трения «инструмент – заготовка», в зависимости от упруго-напряжённого состояния, может быть вызвано пластической деформацией продольной или поперечной и, соответственно, приводящее к формированию продольных или поперечных навалов впереди или с боковых сторон относительно направления движения кромки инструмента.

При мягком способе нагружения (вдавливании или царапании), форма отпечатка в ГПУ- кристаллах зависит от анизотропии упругопластических характеристик и интенсивности локализации (сосредоточения) пластической деформации в зоне контакта с инструментом.

В процессе развития равномерной пластической деформации (деформационного упрочнения) по механизму многостадийной эволюции субструктуры, в теле зерен возникают встречные концентраторы напряжений, затрудняющие локализацию пластической деформации [1, 15-20]. При этом профиль валика отпечатка или риски, образующихся в процессе вдавливания или царапания, сильно отличаются.

Чем меньше в нагруженном индентором материале развивается равномерное деформационное упрочнение, тем раньше наступает локализация пластической деформации в узкой локальной области вдоль кромки концентратора, и тем отпечаток или риска в металле точнее повторяют форму индентора или резца.

Как было показано в работе [15], пластическое оттеснение, сопровождающее вдавливание индентора или царапание резцом в контактной зоне пары трения «инструмент – заготовка», в зависимости от упруго-напряжённого состояния, может быть вызвано пластической деформацией продольной или поперечной и, соответственно, приводящее к формированию продольных или поперечных навалов впереди или с боковых сторон относительно направления движения кромки инструмента (индентора).

К сожалению, метод инструментального индентирования регистрирует только продольную пластическую деформацию, формирующуюся впереди относительно направления движения кромки индентора. Поэтому в данной работе был произведен расчёт критических напряжений на сдвиг ($\tau_{\text{мет}}$) и контактных напряжений ($\tau_{\text{конт}}$). Ранее было показано, [15], что реализация поперечного и продольного пластического оттеснения зависит от отношения $\tau_{\text{конт}} / \tau_{\text{мет}}$ наблюдаются при относительно низких и высоких контактных напряжениях, соответственно. Чем быстрее контактные напряжения $\tau_{\text{конт}}$ нарастают по величине и приближаются к сопротивлению металла на сдвиг τ

мет (отношение $\tau_{\text{конт}} / \tau_{\text{мет}}$ стремится к единице), тем эффективнее оказывается продвижение индентора (инструмента) вглубь заготовки.

Для всех исследованных материалов по формуле 1 было рассчитано (см. табл. 4) критическое напряжение на сдвиг ($\tau_{\text{мет}}$), связанное с модулем упругости поперечного деформирования G , при котором в металле возникает микросдвиг (трансляционная неустойчивость).

$$\tau_{\text{мет}} = 2,5 \cdot 10^{-4} G \quad (1)$$

Фактическое контактное сдвиговое напряжение, $\tau_{\text{конт}}$, вызывающее пластическую деформацию обрабатываемого материала, рассчитывалось по формуле 2:

$$\tau_{\text{конт}} = \alpha G b \rho^{1/2} \quad (2)$$

где G – модуль упругости поперечного деформирования, $\alpha = 0.2 \dots 0.5$ – константа, a – параметр решётки, $b = a/2$ – вектор Бюргера, ρ – плотность дислокаций.

Результаты измерения плотности дислокаций в контактной зоне стружкообразования исследуемых материалов, авторами были получены ранее [20] с помощью просвечивающей электронной микроскопии и представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Влияние свойств исследованных сплавов обрабатываемых заготовок на проникновение и износ индентора (инструмента) при механической обработке и индентировании

Сплав	μ Коэффициент Пуассона	$\Delta\varepsilon / \sigma_0$ 10^{-5} МПа ⁻¹ общая деформация	$\rho \cdot 10^{12}$ м ⁻² [20]	α	$\tau_{\text{конт}}$ МПа	$\tau_{\text{мет}}$ МПа	$\frac{\tau_{\text{конт}}}{\tau_{\text{мет}}}$	Износ индентора, мкм	Характер и коэффициент обрабатываемости (Км),	
АМц	0.3	1,543	13,69	0,3	6,19	6,9	0,89	14	Легкая	1,0
Ст 45	0,32	0,960	7,79	0,5	15,57	19,5	0,79	25	Средняя	0,8
ХВГ	0.33	0,510	6,66	0,5	14,40	19,3	0,75	31	Средняя	0,7
ВТ-23	0.43	0,375	2,80	0,2	2,16	10,8	0,19	365	Трудная	0,25

Расчёт общей деформации ($\Delta\varepsilon$) кристаллических решеток [14] производили по формуле (3).

$$\Delta\varepsilon = 3(1-2\mu) \cdot \sigma_0 / E \quad (3)$$

где σ_0 – сумма главных нормальных напряжений.

Как показали результаты расчёта (табл. 4) для исследованных сплавов в направлении от АМц → Ст45 → ХВГ до ВТ23 уменьшалась общая

деформация ($\Delta\varepsilon$) кристаллических решеток и, особенно, доля продольной деформации, напротив, доля поперечной деформации возрастала, так как, возрастал коэффициент Пуассона μ , характеризующий долю поперечной деформации.

Таким образом, можно полагать, что существует связь между сдвиговой деформацией в зоне стружкообразования и износом инструмента.

Результаты расчёта τ мет, τ конт, τ конт / τ мет представлены в таблице 4. Как видно из таблицы, износ резца и труднообрабатываемость возрастают, а отношение контактных напряжений к сопротивлению металла на сдвиг снижается в направлении от АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23.

Таким образом, с увеличением контактных напряжений τ конт и уменьшением сопротивления металла на сдвиг τ мет (отношение τ конт / τ мет стремится к единице), продвижение индентора (инструмента) вглубь заготовки оказывается более эффективным. При этом уменьшается износ инструмента и повышается коэффициент обрабатываемости (K_m) материала заготовки.

2.5. Оценка доли упругой, пластической (продольной) и общей деформации по глубине проникновения индентора при индентировании исследованных сплавов

Особенности упругопластической деформации приповерхностных объемов материалов заготовок при вдавливании индентором или царапании резцом и её локализации в области фактического контакта с поверхностью индентора (концентратора) изучены еще недостаточно.

Известно, что для всех материалов модули продольной упругости (E) и поперечного сдвига (G) непосредственно связаны с силами межатомного взаимодействия и оказываются мерой сопротивления продольному и поперечному деформированию [14].

В случае вдавливания и царапания, способ нагружения оказывается мягким, так как, нарастание касательных напряжений в металле происходит быстрее нормальных. При этом возрастает доля поперечной деформации (изменение поперечных размеров тела), которую учитывает коэффициент Пуассона (μ). Для большинства металлов и сплавов с кубической сингонией (см. табл. 4), отношение изменения поперечных к продольным размерам тела (μ), находится в узком интервале 0,25...0,35 [11]. Для сплавов с гексагональной сингонией μ может сильно различаться от 0,322 до 0,485 в зависимости от кристаллографической ориентации приложенных напряжений.

Известно, что профиль валика вокруг отпечатка или риски, образующийся в процессе измерения твёрдости или царапания, зависит от способности материала к поперечной пластической деформации.

На рис. 8-11 представлены результаты анализа упругой, пластической и общей деформации исследованных сплавов от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г, полученные с помощью метода инструментального индентирования.

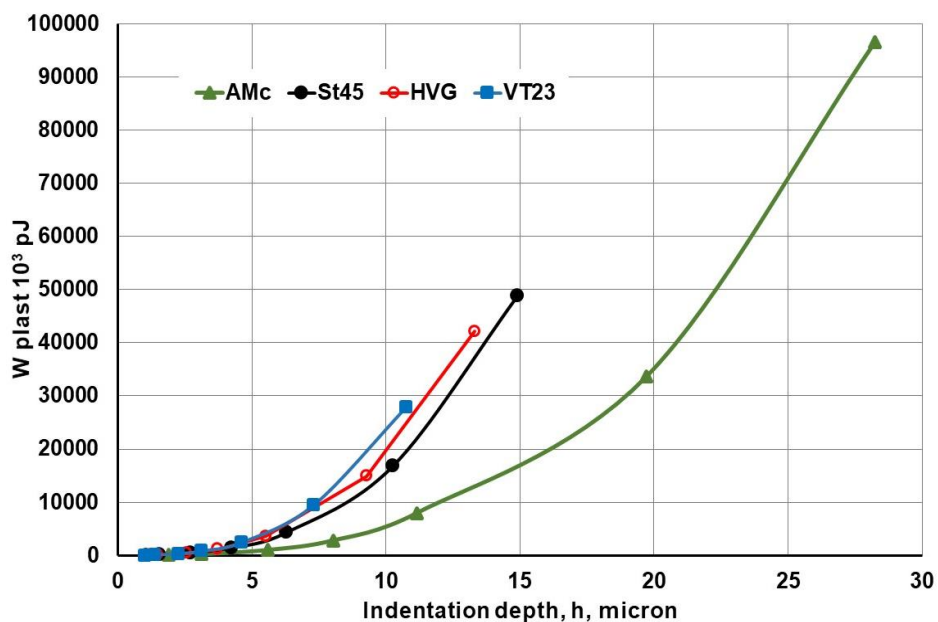


Рис. 8. Изменение продольной пластической деформации W_{plast} от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г. для всех исследованных сплавов.

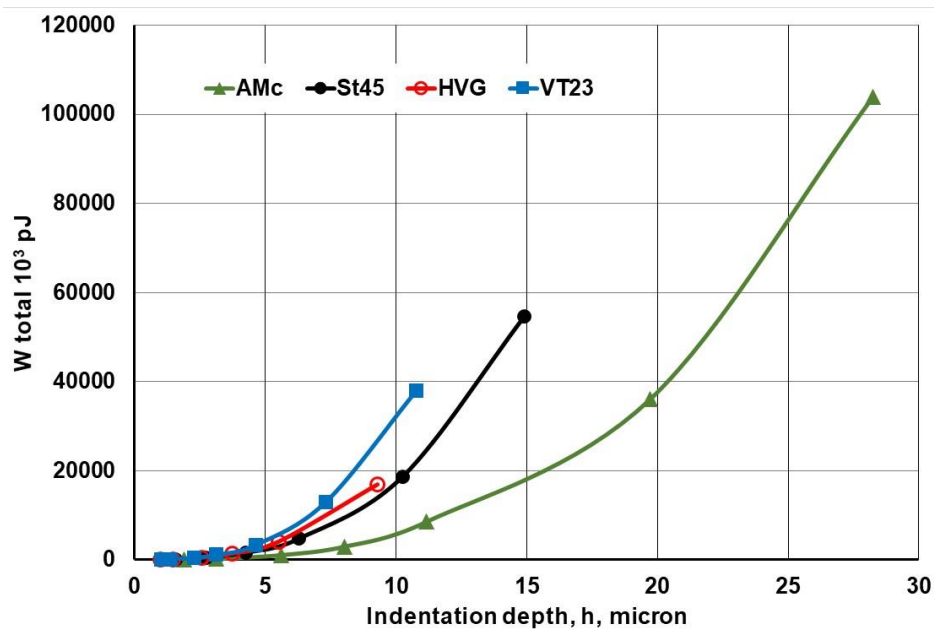


Рис. 9. Изменение общей деформации W_{total} от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г. для всех исследованных сплавов.

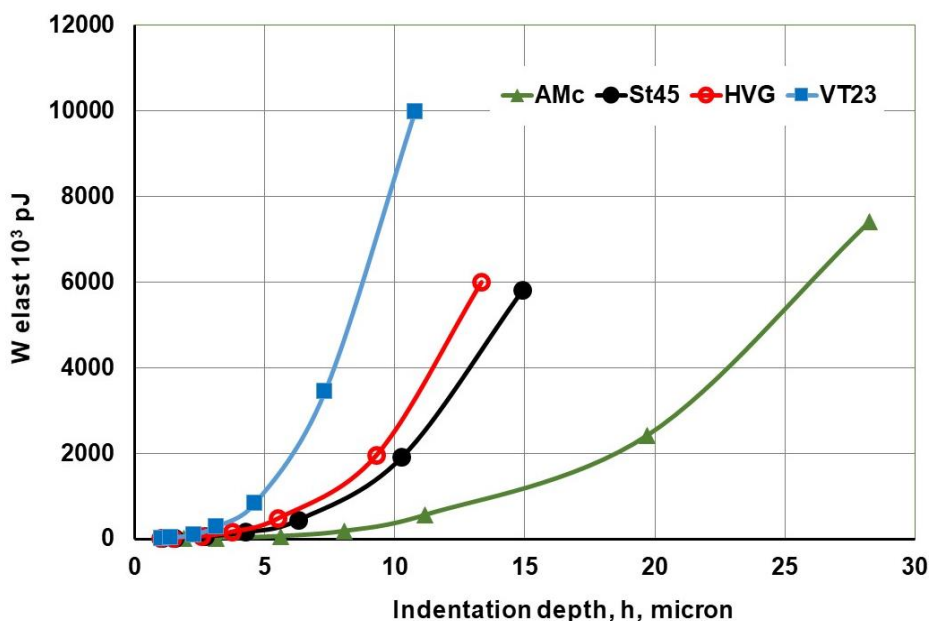


Рис. 10. Изменение упругой деформации W_{elast} от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г. для всех исследованных сплавов.

Локализация деформации в долевом направлении не происходила, относительно низкие продольные контактные напряжения $\tau_{\text{конт}}$, по сравнению с предельным сопротивлением материала заготовки на сдвиг $\tau_{\text{мет}}$, затрудняли продвижение индентора (инструмента) вглубь заготовки. Профиль валика вокруг отпечатка в металле снижался по высоте и увеличивался по ширине, образуя навалы и не повторял форму индентора или резца.

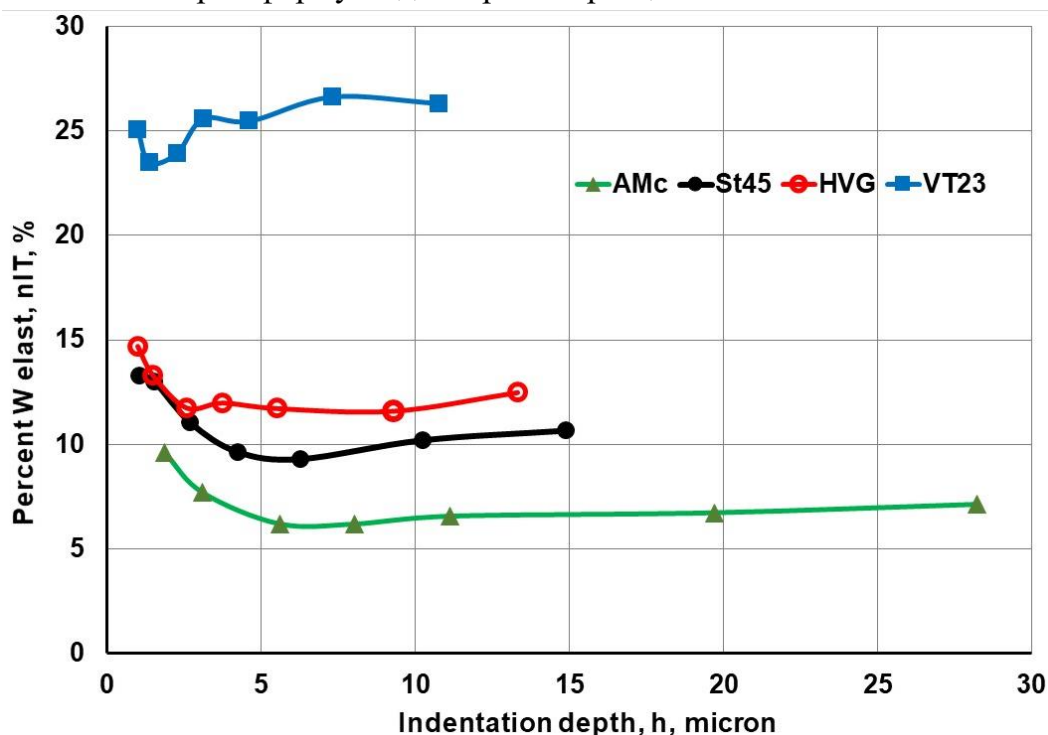


Рис. 11. Изменение доли упругой деформации W_{elast} от глубины погружения индентора при нагрузке до 1000 г. для всех исследованных сплавов.

Таким образом, можно полагать, что процесс стружкообразования будет облегчен вблизи сильных концентраторов напряжений, в материалах в которых релаксационные процессы заторможены, в условиях высоких скоростей и низких температур деформирования.

Заключение

В процессе вдавливания и царапания индентором (инструментом), способ нагружения оказывается мягким, так как, нарастание касательных напряжений в металле происходит быстрее нормальных. При этом возрастает доля поперечной деформации (изменение поперечных размеров тела). Вокруг отпечатка индентора могут появляться навалы.

В процессе развития равномерной пластической деформации (деформационного упрочнения) по механизму многостадийной эволюции субструктуры [19-20], в теле зерен возникают встречные концентраторы напряжений, затрудняющие локализацию пластической деформации [1, 12, 17, 18, 19, 20, 21]. Чем позже в нагруженном индентором материале развивается равномерное деформационное упрочнение, тем раньше наступает локализация пластической деформации в узкой локальной области вдоль кромки концентратора, и тем отпечаток или риска в металле точнее повторяют форму индентора или резца. Локализация продольной деформации облегчает, а поперечная деформация тормозит продвижение индентора вглубь заготовки.

Увеличение продольных контактных напряжений $\tau_{\text{конт}}$ по сравнению с предельным сопротивлением материала на сдвиг $\tau_{\text{мет}}$ (отношение $\tau_{\text{конт}} / \tau_{\text{мет}}$ стремится к единице), приводит к локализации продольной пластической деформации в узкой локальной области вдоль кромки индентора (концентратора).

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Установлена природа труднообрабатываемости сплавов на основе титана марки ВТ6, ВТ23. С увеличением скорости резания тепло локализуется в зоне контакта стружки с резцом (концентратором). В этом случае стружкообразование происходит при относительно высоких температурах в условиях повышенной релаксации контактных напряжений, что затрудняет режущую способность инструмента.

2. Экспериментально установлено, что с увеличением глубины погружения индентора (до 30 микрон) в исследуемые сплавы, значения инструментальной твердости (H_{1T}), модуля упругости (E_{1T}), их отношения (H_{1T} / E_{1T}) стремились к значениям классической микротвёрдости H_{μ} , модуля Юнга E и их отношению (H_{μ} / E).

3. Для исследованных сплавов в направлении от АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23 уменьшались общая (W_{total}), пластическая (W_{plast}) деформация и её продольная составляющая. Напротив, доля упругой (W_{elast} , Π_{1T}) и поперечной деформации возрастали. Способность сплавов к поперечной

деформации возрастала с ростом коэффициента Пуассона (μ) от 0,3 \rightarrow 0,32 \rightarrow 0,33 до 0,43, соответственно.

4. Склонность к деформационному упрочнению сплавов возрастала в направлении от АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23. В сплаве титана ВТ23, наряду с деформационным упрочнением, имело место периодическое релаксационное разупрочнение. Диссипативные модуляции структуры и микротвердости в сплаве ВТ-23 могли явиться причиной снижения напряжений в зоне контакта с индентором (инструментом).

5. Для исследованных сплавов в направлении от АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23 уменьшались контактные напряжения (τ конт) по сравнению с сопротивлением металла на сдвиг (τ мет) и их отношения (τ конт / τ мет) от 0,89 \rightarrow 0,79 \rightarrow 0,75 до 0,19, соответственно. Увеличение доли поперечной деформации, ориентированной поперёк движению индентора, затрудняло его продвижение вглубь заготовки.

6. В исследованных сплавах от АМц \rightarrow Ст45 \rightarrow ХВГ до ВТ23 возрастали износ инструмента и труднообрабатываемость заготовок с уменьшением коэффициента (K_m) от 1,0 \rightarrow 0,8 \rightarrow 0,7 до 0,25, соответственно.

7. В труднообрабатываемом сплаве титана ВТ23 достигались минимальная продольная пластическая и общая деформация при максимальной доле упругой и поперечной деформации (максимальный коэффициент Пуассона, μ). В этом случае локализации деформации в долевом направлении не происходило. В контактной зоне вблизи индентора, наряду с деформационным упрочнением, имело место интенсивное периодическое релаксационное разупрочнение, что снижало контактные напряжения. Увеличение доли поперечной деформации, ориентированной поперёк движению индентора (инструмента), затрудняло его проникновение вглубь заготовки. При этом увеличивался износ инструмента и понижался коэффициент обрабатываемости (K_m) материала заготовки.

7. Легкообрабатываемые материалы, обладают относительно низкой прочностью и высокой теплопроводностью. В них, в процессе механической обработки в широком диапазоне скоростей, не возникает деформационного упрочнения, формируются очень высокие контактные напряжения (τ конт \approx 0,5 τ мет). При обработке таких материалов (например сплава АМц) износ инструмента низкий.

8. Труднообрабатываемые материалы, обладают относительно высокой прочностью, низкой теплопроводностью. В них, в процессе механической обработки в широком диапазоне скоростей, возникают деформационное упрочнение и релаксационное разупрочнение, формируются низкие контактные напряжения (τ конт $<$ 0,5 τ мет). Перед резцом (индентором) протекает поперечное пластическое отеснение. При обработке таких материалов (например сплава ВТ23) износ инструмента высокий.

9. Среднеобрабатываемые материалы, обладают прочностью и теплопроводностью чувствительными к температуре и скорости деформирования. При малых скоростях механической обработки, износ инструмента низкий. При этом достигаются **высокие контактные**

напряжения ($\tau_{\text{конт}} > 0,5 \tau_{\text{мет}}$) и перед резцом (индентором) протекает продольное пластическое оттеснение. С увеличением скорости резания сверх определённой (критической), в результате формирующихся высоких контактных температур и релаксационных процессов, вблизи поверхности инструмента, **контактные напряжения снижаются** ($\tau_{\text{конт}} < 0,5 \tau_{\text{мет}}$) и перед резцом (индентором) протекает поперечное пластическое оттеснение. При обработке, например, сталей Ст45 и ХВГ, начиная со скоростей резания 165 и 195 м/мин, соответственно, износ инструмента резко увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Komanduri R.* New Observations on the Mechanism of Chip Formation When Machining Titanium Alloys. *Wear.* 69 (1981) 179–188.
2. *Эпштейн Ж.Н.* Высокоскоростная деформация и структура металлов. М: Металлургия. 1971. 197 с.
3. *Flom D.G., Komanduri R., and Lee M.* High-Speed Machining of Metals. *Ann. Rev. Mater. Sci.* (1994) 231–278.
4. *Скотникова М.А., Касторский Д.А., Строкина Т.И.* Структурные превращения в металлах при скоростном резании. *Вопросы материаловедения.* 2002. № 1. С. 199-215.
5. *Скотникова М.А., Виноградов В.В., Крылов Н.А.* Учет волновой теории пластической деформации при высокоскоростной механической обработке поверхностей заготовок. *Металлообработка, СПб,* 4, 11 (2005) 12-17.
6. *Иванов Е.К., Скотникова М.А., Крылов Н.А.* Структурно-фазовые превращения в труднообрабатываемых материалах как способ повышения износостойкости инструмента. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование.* 1, 2012. 41–52.
7. *Скотникова М.А., Иванова Г.В., Попов А.А., Паитова О.В.* Локализация пластической деформации в ГПУ- кристаллах при вдавливании и царапании. *Современное машиностроение. Наука и образование ММЕСЕ-2017.* т.6, 402-412, 2017.
8. *Oliver W.C. and Pharr G.M.* An Improved technique for determining the hardness and elastic modulus using load displacement sensing indentation experiments. *J Mater. Res.* 7 (1992) 1564-1583.
9. *Jaroslav Mencík.* Determination of mechanical properties by instrumented indentation. *Mechanica. ASM International* 42 (2006) 19–29.
10. *Khokhlova Julia, Khokhlov Maksym, Alla Tunik et other.* Nanoindentation of Micro Weld Formed Through Thin Nanolayered Filler. *Springer book.* 203 (2014) 251–262.
11. *Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др.* Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 255 с.
12. *Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Е. и др.* Кооперативные процессы и локализация деформации. Киев: Наукова Думка, 1989. 320 с.
13. *Финкель В.М.* Физика разрушения. М: Металлургия, 1970. 322 с.

14. Качанов Л.М. Фундаментальная механика разрушения. М: Наука, 1974. 311 с.
15. Skotnikova M.A., Ivanova G.V. Popov A.A. Localization of plastic deformation HCP—crystals during indentation and scratching. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 26 (2018) 143–150.
16. Скотникова М.А., Стрельникова А.А., Иванова Г.В. и др. Локализация пластической деформации в аустенитной стали при низкотемпературном циклирующем нагружении. Современное машиностроение: Наука и образование: СПб. ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. (2019) 444–464.
17. Skotnikova, M.A., Krylov, N.A., Tsvetkova, G.V. et other. Structural and phase transformation in material of steam turbines blades after high-speed mechanical effect. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 25 (2016) 159–168.
18. Skotnikova, M.A., Krylov, N.A. About the nature of dissipative processes in cutting treatments of titanium vanes Lecture Notes in Mechanical Engineering. 26 (2017) 115–123.
19. Krylov N.A., Skotnikova M.A., Popov A.A. Tool Wear at High-Speed Cutting. 17th Int. Symposium “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”. School of Engineering, Tallinn University of Technology, 15–20.01.2018, Kuressaare, Estonia. 2018 34–37.
20. Skotnikova M.A., Krylov N.A., Popov A.A. Structural and phase transformation in metals at high speed cutting and wear of tool. Procedia Engineering. (2017) 777–782.
21. М.А. Скотникова, А.А. Попов, Г.В. Иванова, Г.В. Цветкова Исследование свойств поверхности сплавов с помощью инструментального индентирования. Изв. ВУЗов ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. (2020). Т. 63, № 5. С. 460-466.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК, Scopus, Web of Science

1. М. А. Скотникова, А. А. Попов, Г. В. Иванова, Г. В. Цветкова Исследование свойств поверхности сплавов с помощью инструментального индентирования. ИЗВ. ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. **2020**. Т. 63, № 5. С. 460-466. (**ВАК**)
2. Margarita A. Skotnikova, Galina V. Ivanova, Alexander A. Popov, Olga V. Paitova. Localization of Plastic Deformation HCP - Crystals During Indentation and Scratching. Advances in Mechanical Engineering. Springer International Publishing. Lecture Notes in Mechanical Engineering **2018** Page: 143-150. Book ISBN: 978-3-319-72928-2. (**Scopus**)
3. Juozas Padgurskas, Vytenis Jankauskas Galina. Ivanova, Svetlana Shasherina. Formation of Nanostructure and Tool Wear During Cutting Treatment of Titanium Alloy. Key Engineering Materials Submitted: 2019-03-11. ISSN: 1662-9795, Vol.

822, pp 677-683 Revised: 2019-03-18. © 2019 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (978-3-0357-1611-5). (Scopus)

4. Margarita A. Skotnikova, Nikolay A. Krylov, Alexander A. Popov. Structural and phase transformation in metals at high-speed cutting and wear of tool. Журнал «Procedia Engineering», Технические науки. № 11-1, 2017. С.1011-1017. (Web of Science)

Публикации в других изданиях

5. Скотникова М.А., Иванова Г.В., Попов А.А., Паитова О.В. Локализация пластической деформации в ГПУ- кристаллах при вдавливании и царапании. Современное машиностроение. Наука и образование ММЕСЕ-2017. т.6, 402-412, 2017. (РИНЦ)

6. Попов А.А., Жуков В.А. Выбор технологии обработки паза на основе напряженного деформированного состояния грибковой фрезы. «Неделя науки СПбПУ»: материалы научного форума с международным участием. Института металлургии, машиностроения и транспорта. Ч.1. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2015 г., с. 71-73. (РИНЦ)

7. Krylov N.A., Skotnikova M.A., Popov A.A. 17th Int. Symposium “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”, School of Engineering, Tallinn University of Technology, 15–20.01.2018, Kuressaare, Estonia, 2018, pp. 34–37.

Аспирант _____ Попов А.А.
(подпись)