

operator.

The application of the data cleaning procedure, the damage detection algorithm based on the MSD (Mahalanobis distance square) method, the construction of logistic curves (regression) ROC, made it possible to fully automatically monitor the steering rod using a single sensor and a simple algorithm that does not require knowledge of physical variables, for example, the axial load on the steering rod.

It is shown that with an increase in damage and an increase in the modal attenuation coefficient from $\xi=5/8L$ to $\xi=8/10L$, the graphs of the ROC curve pass through the upper left corner, where the proportion of truly positive results is 100%, and the predictive ability of the model increases, especially when the results are presented with a moving average.

Keywords: automation, wear monitoring, pipeline.

The work examines the main methods for automating wear fixation on different types of surfaces and equipment, including pipelines, and expresses an opinion on how the technology can be supplemented by combining known technologies from different areas into one technology with possible development.

Keywords: Automation, wear fixation, gas pipeline.

УДК 621.9, 539.622

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-268

Д.И. Гладких, Е.В. Фоминов, В.А. Лебедев, В.Е. Гвинджилия, А.А. Марченко
Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия, ya@dgladckih.ru

ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 10ГН2НМФА

Аннотация

Данное исследование посвящено оценке шероховатости обработанной поверхности и средней температуры резания при чистовом продольном точении заготовок из жаропрочной высоколегированной стали 10ГН2НМФА без применения охлаждения пластинами твёрдого сплава Т15К6. Экспериментально установлено, что зависимость средней температуры от скорости обработки в исследуемом диапазоне режимов резания носит экстремальный характер для каждого значения подачи, а значения средней шероховатости Ra при обработке острозаточенным инструментом находилась в диапазоне Ra 0.8-1.25 мкм, что соответствует 7 классу шероховатости. В ходе эволюционных трансформаций в системе резания наименьшее изменение поверхностного микрорельефа для каждого значения подачи зафиксировано при скоростях, характеризующихся минимальными температурами резания. Средняя шероховатость к концу периода стойкости пластин во всех случаях находилась в пределах Ra 1.8-2.5 мкм. Таким образом, при сухой чистовой обработке заготовок из жаропрочной стали 10ГН2НМФА с шероховатостью поверхности по 6 классу может быть использован полный ресурс пластин вплоть до критического износа, для поверхностей 7 класса шероховатости время работы пластин сокращается до 40-60% от периода стойкости. В это случае может быть получена поверхность точения заданного качества без применения дополнительных чистовых проходов и операций.

Ключевые слова: жаропрочная сталь, продольное точение, температура

резания, шероховатость поверхности

Введение

Для изготовления большого числа деталей в области энергетического машиностроения применяются жаропрочные конструкционные стали. Одной из наиболее распространённых марок таких сталей является 10ГН2НМФА. Данный материал применяется для деталей, работающих в области высоких давлений и температур [1-3]. Технологические процессы изготовления этих деталей содержат значительную долю токарных операций, как правило, это наружное черновое и чистовое точение, растачивание, нарезание наружной и внутренней резьбы. Обработка может осуществляться на металлорежущих станках со значительным сроком эксплуатации. В этом случае процесс резания характеризуется высоким уровнем вибрационных возмущений со стороны привода главного движения и привода подач. Усиленные вибрации приводят также к внезапным отказам (поломкам) режущей части инструмента, сужают диапазон возможных скоростей и подач при лезвийной обработке, увеличивает среднее значение температуры в зоне резания и повышают уровень её флуктуаций [4-6]. Учёт тепловых процессов при выборе режимов обработки особенно актуален для заготовок из материалов с низкой теплопроводностью [7-9]. Повышенный износ инструмента в сочетании с высокой температурой на контакте «задняя поверхность инструмента – обработанная поверхность заготовки» и значительными флуктуациями параметров системы резания способствует ухудшению ряда характеристик поверхностного микрорельефа, в том числе и в ходе эволюционных изменений в системе резания [7]. К таким параметрам относятся средняя, медианная и максимальные значения шероховатости, статистические показатели шероховатости как случайной величины – дисперсия, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, а также изменение свойств приповерхностного слоя обработанного материала – твёрдости и градиента физико-механических свойств. В этом случае при выборе режимов обработки для технологического процесса необходимо учитывать ряд погрешностей и негативных факторов, вносимых в процесс изготовления деталей со стороны обрабатывающего оборудования [5,10,11]. Получение поверхности высокого качества микрорельефа является особенно актуальным при выполнении чистовых токарных проходов. В этом случае возможно сокращение количества операций, необходимых для достижения заданных показателей шероховатости, и минимизировать износ резца. В соответствии с современными требованиями экономичности и экологичности металлообрабатывающих производств всё большее количество предприятий отдаёт предпочтение точению деталей даже из труднообрабатываемых материалов при минимальном использовании смазочно-охлаждающих технологических сред, в том числе и растительного состава, или же вовсе отказывается от их применения при выполнении целого ряда операций лезвийной обработки [12-15].

Целью настоящего исследования является оценка трибологических показателей процесса чистового точения заготовок из жаропрочной высоколегированной стали 10ГН2НМФА на токарном станке со значительным сроком эксплуатации без применения охлаждения.

Методы

Точение заготовок из стали 10ГН2НМФА осуществлялось на станке 1К62, оснащённом системой бесступенчатой настройки числа оборотов привода главного

движения. Подача при выполнении экспериментов составляла $S = 0,097 \dots 0,26$ мм/об, скорость резания варьировалась в пределах ряда $V = 50-240$ м/мин, глубина срезаемого слоя $t = 0,5$ мм (для чистового точения). Длина заготовок составляла 400 мм, наружный диаметр составлял 120 мм. Общая температура в зоне резания T фиксировалась в режиме реального времени при помощи измерительного лабораторного стенда STD 201.1. методом измерения термоЭДС, для чего предварительно проводилась тарировка термопары.

Интенсивность изнашивания инструментальных режущих материалов оценивалось на основании величины износа режущих пластин по задней поверхности h с помощью оптического инструментального микроскопа. Качество обработанной поверхности оценивалось на основании исследования и сравнения средней шероховатости R_a мкм. Оценка этих показателей, а также построение профилограмм обработанных участков, осуществлялась с помощью портативного профилографа-профилометра SurfTest SJ-210 (Япония). Длина трассы $L = 1,5$ мм; измерения для каждого участка производились 25 раз, полученные данные обрабатывались с применением методов теории надёжности по методике [16,17] с использованием программы MathCAD [18]. Износ по задней поверхности резца h оценивался посредством оптической микроскопии.

Результаты и обсуждение

Экспериментально установлено, что зависимости $T(V)$ носят экстремальный характер, причём диапазон скоростей резания, характеризующихся минимальными значениями температуры, смещается с ростом подачи в область более низких скоростей. Так, при подаче $S = 0,097$ мм/об минимальные температуры $T = 750-800$ °С соответствуют скоростям резания 190–230 м/мин, а при $S = 0,195$ мм/об наименьшие температуры 890–940 °С достигаются уже при $V = 160-190$ м/мин. С точки зрения теплового режима зоны резания такие скорости обработки для каждой подачи можно считать наиболее благоприятными.

Характерные профилограммы поверхностей точения для постоянной подачи и различных скоростей резания при обработке заготовок острозаточенным инструментом представлены на рис. 1, а, б. Влияние скорости резания и подачи на характер поверхностного микрорельефа и статистические показатели шероховатости обработанной поверхности оценивалась на основании профилограмм.

На рисунке 2 представлены результаты дисперсионного анализа влияния скорости резания на шероховатость на примере подачи $s = 0,12$ мм/об. Приведены значения 25, 50 (медианный уровень) и 75 % квартилей для каждой выборки, а также максимальные/минимальные величины измеряемых параметров, зафиксированные в ходе исследований. Оценка значимости влияния каждого фактора скорости резания V на функцию отклика (среднюю шероховатость R_a) определяется на основании сравнения расчётной величины F -фактора для анализируемых выборок с его критическим значением $F_{кр}$. Дополнительно произведен расчёт и сравнение P -фактора с заданным допустимым значением ошибки $\alpha = 0,05$. При соблюдении двух условий $F > F_{кр}$ и $P < 0,05$ фактор режима обработки считается значимым. Следует отметить, что зависимости средней шероховатости обработанной поверхности от скорости резания носят различный характер в зависимости от применимой подачи. Фиксировались как зависимости с экспоненциальным ростом R_a от V как на рисунке 3, так и экстремального типа. Однако, на всех исследованных режимах резания

значения средней шероховатости R_a не выходят для исследуемой стали за рамки диапазона 7 класса шероховатости (R_a 0,8-1,25 мкм) при условии, что обработка производится острозаточенным инструментом.

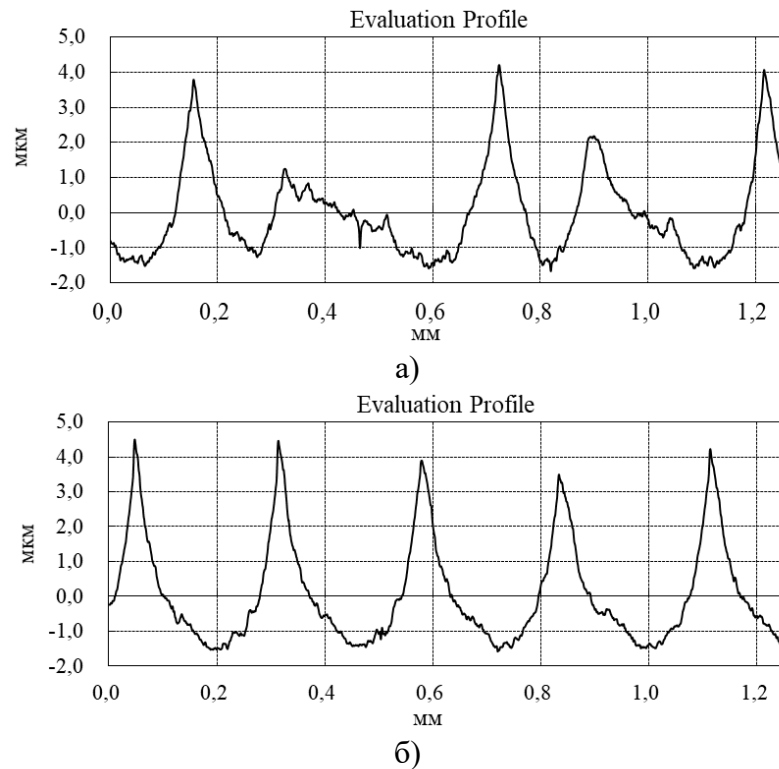


Рисунок 1 – Профилограммы обработанных поверхностей ($S = 0,26$ мм/об, $t = 0,5$ мм) при скоростях резания: а) $V = 70$ м/мин; б) $V = 190$ м/мин

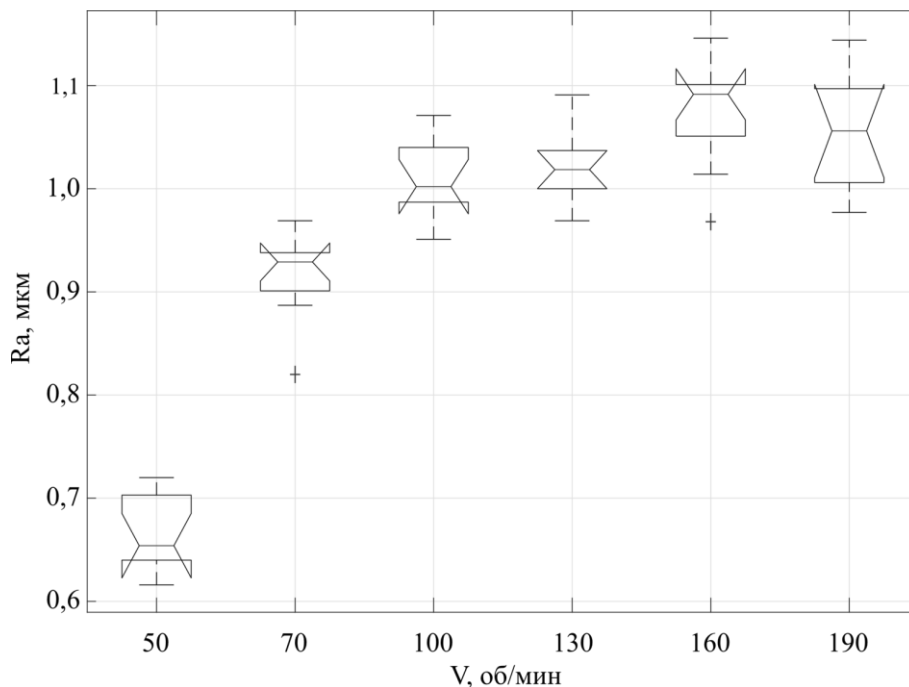


Рисунок 2 – Влияние скорости резания на среднюю шероховатость поверхности точения R_a при подаче $s = 0,12$ мм/об

Экспериментально исследованы эволюционные изменения показателей микрорельефа обработанных поверхностей, связанные с затуплением режущей кромки резца и изменением геометрии режущего клина, обусловленные процессами изнашивания. На рисунке представлены профилограммы поверхностей точения с

указанием пути резания L и соответствующего ему износа по задней поверхности h .

По результатам стойкостных испытаний установлено, что при достижении режущими пластинами критического износа $h_{кр} = 0,12$ мм, исходная шероховатость возрастает до 1,8-2,5 мкм, что соответствует 5-6 классам шероховатости.

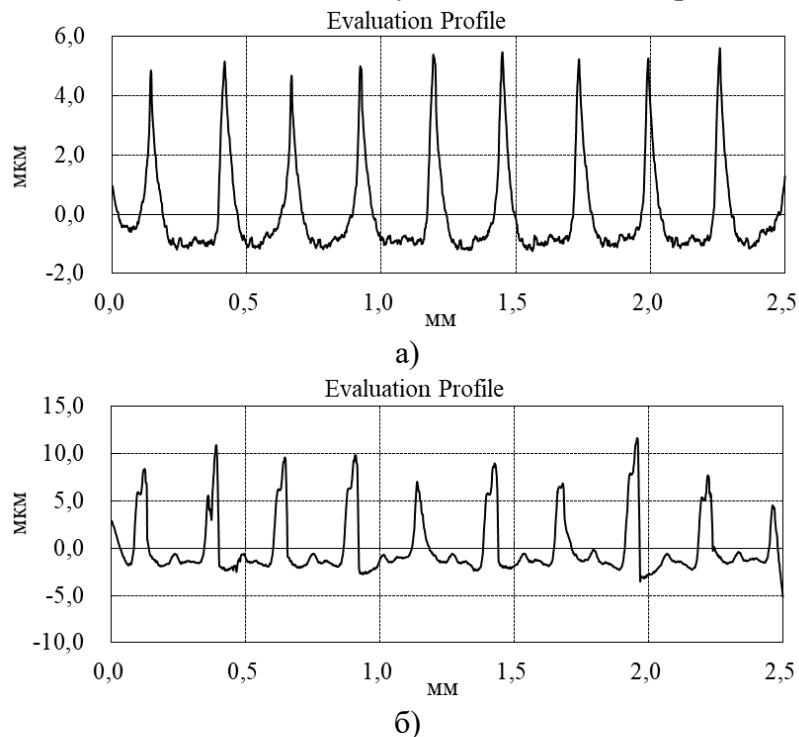


Рисунок 3 – Эволюционные изменения поверхностного микрорельефа обработанной поверхности, вызванное затуплением режущей кромки инструмента ($V = 160$ м/мин; $S = 0,26$ об/мин, $t=0,5$ мм): а) $L = 988,44$ м, $h = 0,025$ мм; б) $L = 5218,61$ м, $h = 0,175$ мм

Заключение

Экспериментально исследованы трибологические показатели процесса чистового точения заготовок из жаропрочной стали 10ГН2НМФА на токарном станке со значительным сроком эксплуатации и высоким уровнем вибрационных возмущений со стороны приводов главного движения и привода подач. Установлено, при в изученном диапазоне сочетаний подач и скоростей обработки при обработке стали острозаточенным инструментом параметры средней шероховатости стали составляют R_a 0,8-1,25 мкм, что укладывается в рамке диапазона 7 класса шероховатости. При достижении режущей пластиной критического износа по задней грани, шероховатость поверхности точения на исследуемых режимах повышалась до R_a 1,8-2,5 мкм. Таким образом, при обработке деталей с шероховатостью поверхности по 6 классу может быть использован полный ресурс пластин вплоть до критического износа. При чистовом точении же поверхностей 7 класса шероховатостей необходимо уменьшать время работы пластин, сокращая его до 40-60 % от периода стойкости. Такой подход позволит избежать дополнительных проходов тонкого точения или шлифования деталей.

Благодарности

«Исследование выполнено по заказу и при финансовой поддержке АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии»», договор № 160312622214 от 14.04.2022 г.»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Čapek, J.; Trojan, K.; Kec, J.; Černý, I.; Ganev, N.; Němeček, S. On the Weldability of thick P355NL1 pressure vessel steel plates using laser welding. *Materials* 2020, 14, 131.
2. Azeem, M.; Ya, H.H.; Alam, M.A.; Kumar, M.; Stabla, P.; Smolnicki, M.; Gemi, L.; Khan, R.; Ahmed, T.; Ma, Q. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: A review. *J. Energy Storage* 2022, 49, 103468
3. Lai, Libang, Paul Chekhonin, Shavkat Akhmadaliev, Jann-Erik Brandenburg, and Frank Bergner. 2023. "Microstructural Characterization of Reactor Pressure Vessel Steels" *Metals* 13, no. 8: 1339. <https://doi.org/10.3390/met13081339>
4. W. Grzesik, *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*, 2nd ed. (Elsevier, Amsterdam, 2017)
5. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Influence of Spindle Wobble in Turning on the Workpiece's Surface Topology // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. N 10. P. 818-823. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18100192>
6. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. The influence of the vibration on the tool shape-generating trajectories when turning. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 42-58. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.3-42-58>
7. Рыжкин А. А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке: Монография / А. А. Рыжкин; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2019. 289 с. ISBN 978-5-7890-1669-5.
8. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов / А. М. Даниелян, П. И. Бобрик, Я. Л. Гуревич и др. – М.: Машиностроение, 1965. – 308 с.
9. Elsadek, A.A. Prediction and optimization of cutting temperature on hard-turning of AISI H13 hot work steel / A.A. Elsadek, A.M. Gaafer, S.S. Mohamed, A. A. Mohamed // *SN Applied Sciences*. — 2020. — Vol. 2, 540. DOI: 10.1007/s42452-020-2303-5
10. Evgeny Fominov, Valeriya Gvindzhiliya, Elena Fisunova, Andrey Marchenko, Viktoriya Suhomlinova Temperature dependence of the front lathe tool surface on evolutionary changes in tribo-deformation indicators of processing *Transport engineering*, 2024; 22024:23; <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-2-23-30>
11. Zakovorotny V.L., Vinokurova I.A. Effect of heat generation on dynamics of cutting process. *Vestnik of Don State Technical University*. 2017;17(3):14-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-3-14-26>
12. Siddique, M.Z.; Faraz, M.I.; Butt, S.I.; Khan, R.; Petru, J.; Jaffery, S.H.I.; Khan, M.A.; Tahir, A.M. Parametric Analysis of Tool Wear, Surface Roughness and Energy Consumption during Turning of Inconel 718 under Dry, Wet and MQL Conditions. *Machines* 2023, 11, 1008. <https://doi.org/10.3390/machines11111008>
13. Binali, R.; Demirpolat, H.; Kuntoğlu, M.; Salur, E. Different Aspects of Machinability in Turning of AISI 304 Stainless Steel: A Sustainable Approach with MQL Technology. *Metals* 2023, 13, 1088. <https://doi.org/10.3390/met13061088>
14. Rajeswari R. Investigation on the Effect of Turning of AISI 304 Stainless Steel Using MQL Technique with Corn Oil as Cutting Fluid and Comparison with Dry Condition. *Engineering Proceedings*. 2024; 61(1):35. <https://doi.org/10.3390/engproc2024061035>
15. Natesh CP, Shashidhara YM, Amarendra HJ, Shetty R, Harisha SR, Shenoy PV, Nayak M, Hegde A, Shetty D, Umesh U. Tribological and Morphological Study of AISI 316L Stainless Steel during Turning under Different Lubrication Conditions. *Lubricants*. 2023; 11(2):52. <https://doi.org/10.3390/lubricants11020052>
16. Острейковский В.А. Теория надежности. - М.: Высш. шк., 2008. - 463 с.
17. D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments* (John Wiley & Sons, 2013), pp. 55–69.

18. B. Maxfield, Essential Mathcad for Engineering, Science, and Math, (Elsevier Science, 2009), pp. 325–371.

D.I. Gladckih, E.V. Fominov, V.A. Lebedev, V.E. Gvindjiliya, A.A. Marchenko
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russia, ya@dgladckih.ru

EVALUATION OF TRIBOLOGICAL PARAMETERS OF TURNING PROCESS 10GN2NMFA HEAT-RESISTANT STEEL

Annotation

This study is devoted to the evaluation of machined surface roughness and average cutting temperature during finishing longitudinal turning of workpieces made of heat-resistant high-alloy steel 10GN2NMFA without the use of cooling with T15K6 carbide plates. It was experimentally established that the dependence of the average temperature on the machining speed in the investigated range of cutting modes has an extreme character for each value of feed, and the values of the average roughness Ra during machining with sharpened tools were in the range of Ra 0.8-1.25 microns, which corresponds to the 7th class of roughness. In the course of evolutionary transformations in the cutting system, the smallest change in surface microrelief for each feed value was recorded at speeds characterized by minimum cutting temperatures. The average roughness by the end of the period of durability of inserts in all cases was within Ra 1.8-2.5 microns. Thus, at dry finishing of workpieces from heat-resistant steel 10GN2NMFA with surface roughness of 6 class the full resource of inserts up to critical wear can be used, for surfaces of 7 class of roughness the time of operation of inserts is reduced to 40-60% of the durability period. In this case, a turning surface of a given quality can be obtained without the use of additional finishing passes and operations.

Keywords: heat-resistant steel, longitudinal turning, cutting temperature, surface roughness

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-269

А.Ю. Рябикин, А.Д. Шестаков, Л.Д. Туптей, М.А. Скотникова, А.Д. Новокшенов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия. ryabikin-98@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация

Проведены сравнительные триботехнические испытания износостойких равнотвердых сталей мартенситного класса Hardox 450, Quard 450 по сравнению с феррито-перлитной сталью 09Г2С. Износостойкость ε возростала в направлении 1,0 \rightarrow 7,9 \rightarrow 18,1 в сталях 09Г2С \rightarrow Hardox 450 \rightarrow Quard 450, соответственно. Построены графики колебаний моментов трения исследованных сталей во времени, проведено их сглаживание (усреднение) методом Ханна. Проведено преобразование