

Повышение качества обработки изделий из низколегированных ферритно-перлитных сталей посредством концентрированного лазерного излучения



А. Е. Ефимов,
доцент кафедры
машиностроения¹,
канд. техн. наук, эл. почта:
Efimov_AE@pers.spmi.ru



В. Д. Успенская,
студент кафедры
машиностроения¹,
эл. почта:
uspenskaya.vasilisa@yandex.ru



А. А. Мотрич,
студент кафедры
машиностроения¹,
эл. почта: motrich.2016@mail.ru

В представленной статье рассмотрены вопросы повышения качественных показателей поверхности изделий из низколегированной стали марки 40X, применяемых в горной промышленности. Отмечено, что на формирование шероховатости наибольшее воздействие оказывает дестабилизация процесса обработки, которая сопровождается возникновением автоколебаний. Для решения данной проблемы разработан метод сегментированной механической обработки. На первом этапе формируют сегментированную зону в поверхностном слое заготовки посредством лазерного излучения с целью модернизации исходной микроструктуры. На втором этапе осуществляют механическую обработку заготовки с сегментированной зоной, активирующую механизм сброса и кратковременной перенастройки условий резания. Реакция системы на данную механику проявляется в изменении процесса стружкообразования, что подтверждается высокоскоростной видеосъемкой. Установлено, что при резании стали 40X происходят зарождение, надлом и дробление сливной стружки по границе сегментированной зоны, что свидетельствует об изменении в протекании процесса стружкообразования и стабилизации обработки. Эффективность предлагаемого метода оценили по параметрам шероховатости поверхности R_a , R_z , R_v . Проведенные исследования показали, что на этапах черновой и получистовой операции общее состояние поверхности заготовки по нормированным параметрам шероховатости улучшается на 18 и 29 % соответственно. Полученные данные позволяют сделать вывод, что применение метода управляемой сегментированной обработки позволяет сократить число выполняемых операций.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, обрабатываемость резанием, автоколебательный процесс, стружкообразование, сегментированная механическая обработка, лазерное излучение, сегментированная зона, модернизированная структура.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.12

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Введение

В настоящее время машиностроение является отраслью, определяющей научно-технический прогресс и занимающей ведущее место в эффективном развитии экономики страны. К одному из его динамично развивающихся направлений относится обрабатывающая отрасль промышленности. Установлено, что существенный вклад в общий объем производства обрабатывающей промышленности вносится фундаментальными отраслями, из них 15 % приходится на металлургию и 20 % на машиностроение.

Металлургия и машиностроение выпускают высококачественную и конкурентоспособную продукцию, предназначенную для оснащения смежных отраслей промышленности. В частности, для горной промышленности широкое распространение получили изделия из черных металлов и сплавов, из которых наиболее востребованными являются конструкционные углеродистые стали и легированные стали [1, 2]. Выбор и применение определенной марки стали с особыми

физико-механическими свойствами обусловлены функциональным назначением и условиями эксплуатации изделия [3–5].

Однако на эксплуатационные свойства изделий оказывает влияние не только заложенные физико-механические свойства материала [6]. Важную роль в устойчивом функционировании изделия выполняют качественные характеристики поверхности [7, 8], которые формируются на этапах механической обработки [9]. В плане эксплуатации изделия наибольший интерес представляют высотные, шаговые и опорные параметры шероховатости, так как оказывают существенное влияние на комплекс требований, а именно: износо- и виброустойчивость, контактную жесткость [10, 11].

Для достижения параметров шероховатости поверхности изделий, особенно из легированных сталей, необходимо учитывать специфику процесса обработки таких материалов [12, 13]. В качестве исследуемой марки материала выбрана хромистая легированная сталь 40X (ГОСТ 4543–71 [14]), структура которой состоит из фазы феррита, твердого раствора

углерода и легирующих элементов в α -железе, а также перлита и эвтектидной смеси двух фаз — феррита и цементита. Наибольший негативный эффект на формирование шероховатости поверхности оказывает дестабилизация процесса механической обработки [15], которая проявляется в возникновении и развитии автоколебаний [16]. Источником генерирования, поддержания и нестабильности автоколебаний при обработке являются: упругая и пластическая деформация срезаемого слоя [17, 18]; тепловыделение в области резания [19, 20]; трение и износ режущего материала [21, 22]. В результате неустойчивый автоколебательный процесс ухудшает качественные показатели поверхности изделия [23, 24]. Таким образом, целью данной работы является улучшение шероховатости поверхности путем подавления амплитуды автоколебательного процесса при механической обработке изделий из низколегированных ферритно-перлитных сталей.

Материалы и методика исследования

Одним из современных решений, позволяющих обеспечить стабильность процесса резания и качественные

показатели поверхности, является метод управляемой сегментированной механической обработки (рис. 1) путем формирования сегментированной (разделяющей) зоны в поверхностном слое заготовки, которая отличается от основного материала микроструктурой [25] и механическими свойствами [26, 27]. В момент прохождения режущим инструментом сегментированной зоны заготовки активируется механизм сброса ранее установившихся условий резания и их кратковременной перенастройки. Реакция системы на данную механику проявляется в изменении процесса стружкообразования [28, 29] и, следовательно, оказывает влияние на интенсивность развития автоколебаний при механической обработке.

Реализацию предлагаемого метода осуществляют в два этапа. На первом этапе создают сегментированную зону с особыми свойствами посредством концентрированного лазерного излучения [30]. В качестве источника излучения выбран иттербиевый волоконный лазерный комплекс модели ЛС-5 с максимальной мощностью 5 кВт. Лазерному воздействию подвергли заготовку из легированной стали 40X длиной $L_3 = 250$ мм и диаметром $D_3 = 45$ мм. К заготовке осуществляли

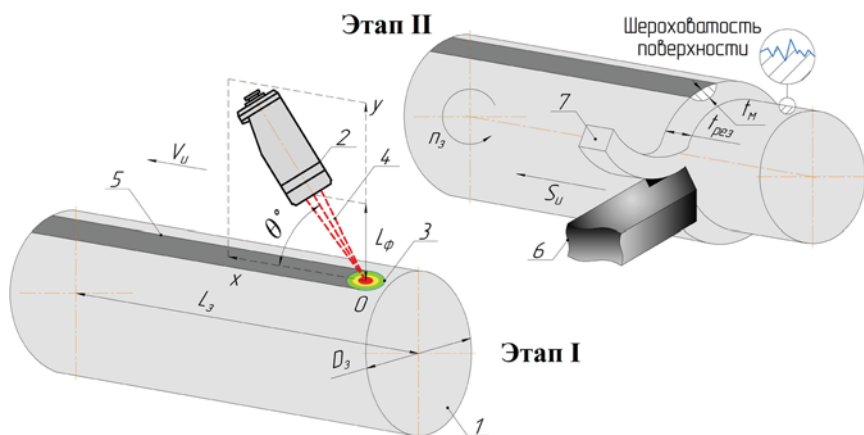


Рис. 1. Метод управляемой сегментированной механической обработки: 1 – заготовка; 2 – лазерная головка; 3 – диаметр лазерного пятна; 4 – лазерное излучение; 5 – сегментированная зона с модернизированной структурой; 6 – режущий инструмент; 7 – процесс стружкообразования

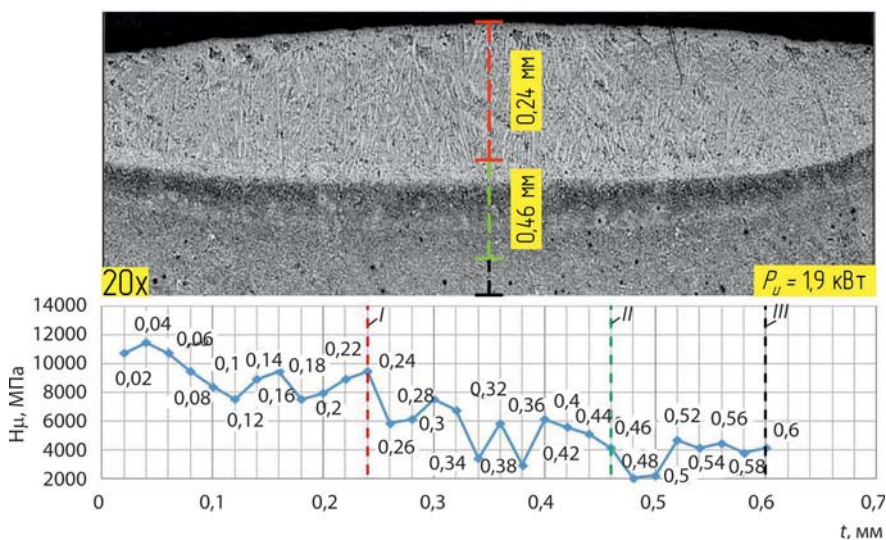


Рис. 2. Микротвердость модернизированной структуры стали 40X: I — пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе; II — переходная зона с неоднородной микроструктурой; III — исходная микроструктура

подвод лазерной головки, настроенной относительно поверхности с началом в центре точки O. Относительно оси ординат O_y выставляли лазерную головку для корректировки длины фокусного расстояния в пределах $L_\phi = 150 \pm 200$ мм, затем наклоняли на угол $\theta = 85$ град. к оси абсцисс O_x , что позволяло регулировать диаметр лазерного пятна, отражающую способность и плотность мощности излучения. Режимы лазерного излучения подбирали экспериментально [31]. Диаметр лазерного пятна $d_n = 4$ мм и скорость перемещения $V_n = 2000$ мм/мин оставались постоянными параметрами [32, 33]. Мощность излучения P_n изменяли в диапазоне от 1,5 до 2,5 кВт с шагом 100 Вт.

Влияние режимов лазерного излучения на структурные превращения в материале и глубину t_m формирования модернизированной микроструктуры оценивали по значению микротвердости с использованием метода Виккерса. Для экспериментальных исследований изготавливали цилиндрические микрошлифы, которые подвергали полировке и травлению в спиртовом растворе азотной кислоты (100 мл этилового спирта, 4 мл азотной кислоты). Микротвердость структуры определяли на микротвердомере модели ПТМ-3 с нагрузкой 50 г (рис. 2).

Проведенные металлографические исследования показали, что в заготовке из стали 40X наблюдается формирование сегментированной зоны с модернизированной структурой [34]. Во всем диапазоне

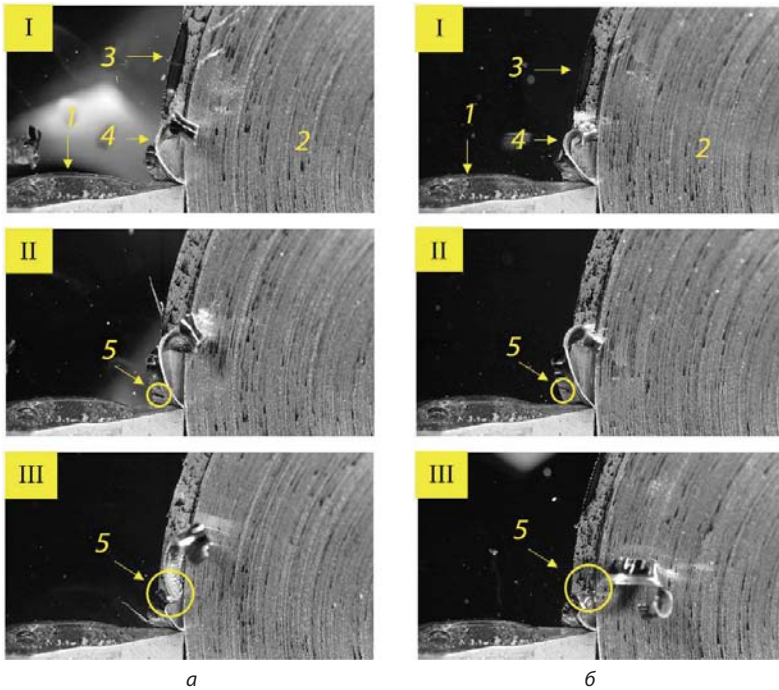


Рис. 3. Высокоскоростная видеосъемка управляемой сегментированной механической обработки:
 а — черновая операция; б — получистовая операция; 1 — режущая пластина; 2 — заготовка; 3 — сегментированная зона с модернизированной структурой; 4 — сливная стружка; 5 — область дробления сливной стружки

изменения режимов лазерного излучения в приповерхностном слое сегментированной зоны зафиксирована однородная микроструктура пересыщенного твердого раствора углерода в α -железе. Микротвердость данной структуры $H_{\mu 50}$ находится в диапазоне от 8400 до 11 400 МПа [35]. По мере увеличения глубины формируется переходная зона с неоднородной структурой, что характеризуется понижением микротвердости от 8400 до 4500 МПа [36]. Микротвердость исходной ферритно-перлитной структуры изменяется в интервале от 2000 до 4500 МПа. Установленные граничные значения микротвердости по глубине сегментированной зоны позволяют индивидуально настраивать параметры лазерного излучения для различных режимов механической обработки при выполнении условия $t_m < t_p$.

Последующую оценку реакции системы на управляемую сегментированную механическую обработку выполняли на металлорежущем станке модели JET GNB-1340A с использованием высокоскоростной видеосъемки. Процесс обработки фиксировали с помощью камеры Phantom VEO 710S со скоростью до 7400 кадр/с (рис. 3).

Для обработки выбрали многогранную ромбическую твердосплавную пластину, которая в сборе с державкой инструмента обладает следующими характеристиками: радиус скругления $r = 0,4$ мм; угол при вершине $\epsilon = 55$ град.; главный угол в плане $\varphi = 93$ град.; передний угол режущей кромки $\gamma = 5$ град. [37]. Режимы обработки предварительно рассчитывали и назначали исходя из конкретного вида операций черновой (получистовой) обработки: скорость резания $V_p = 97$ (161) м/мин; подача $S_p = 0,17$ (0,12) мм/об; глубина резания $t_p = 0,7$ (0,5) мм; глубина модернизированной структуры $t_m = 0,66$ (0,46) мм.

Условно, процесс сегментированной механической обработки можно разложить на три стадии [38, 39]. На первой

стадии I происходит упругопластическая деформация металла с заданной глубиной резания, которая приводит к формированию в плоскости сдвига сливной стружки [40], сходящей по передней поверхности режущей пластины. Вторая стадия II сопровождается входом режущей пластины в сегментированную зону с измененными свойствами. В результате происходит резкий сброс и перенастройка условий процесса резания, которое приводит к зарождению трещины в сливной стружке по границе сегментированной зоны. На третьей стадии III происходит окончательное развитие трещины, образование надлома и дробление сливной стружки, что свидетельствует об изменениях в протекании процесса стружкообразования и стабилизации операции механической обработки.

Результаты исследования и их обсуждение

Результат эффективности метода управляемой сегментированной механической обработки оценивали по параметрам шероховатости поверхности R_a, R_z . Для комплексной оценки состояния качества поверхности дополнительно ввели параметр R_v , характеризующий максимальную глубину впадин профиля. Данный параметр шероховатости использовали для выявления глубоких трещин, которые являются концентраторами напряжений и причиной преждевременной поломки изделия. Нормированные показатели шероховатости измеряли с использованием портативного профилометра модели SurfTest SJ-210 в продольном направлении профиля поверхности заготовки из стали 40X. В ходе проведения экспериментальных измерений оценку шероховатости выполняли не менее 4 раз. Базовая длина исследуемого участка поверхности заготовки составляла 0,8 мм, шаг измерения — 2,5 мкм.

Согласно результатам исследования, наибольшая эффективность процесса черновой обработки обеспечивается при высоких скоростях резания $V_p = 161$ м/мин, подаче $S_p = 0,21$ мм/об и глубине модернизированной структуры $t_m = 0,66$ мм (рис. 4, а). Эксперимент показал, что в условиях использования предлагаемого метода с подачей S_p в диапазоне от 0,12 до 0,17 мм/об и варьируемой скоростью резания V_p от 59 до 161 м/мин имеется незначительная тенденция к приросту значений шероховатости поверхности. При оценке параметров шероховатости установлено, что значение R_a на 12–17 % ниже, чем при стандартной обработке заготовки. Показатель R_z улучшается на 12–25 %, а максимальная глубина впадины профиля R_v — на 12–37 %.

При получистовой обработке заготовки с глубиной сегментированной зоны 0,46 мм наилучшая эффективность отмечена при режиме получистовой обработки, $S_p = 0,17$ мм/об, $t_p = 0,6$ мм (см. рис. 4, б). На выбранных получистовых режимах наблюдают повышенные начальные значения шероховатости поверхности по отношению к стандартной черновой обработке. Данный эффект объясняется дестабилизацией

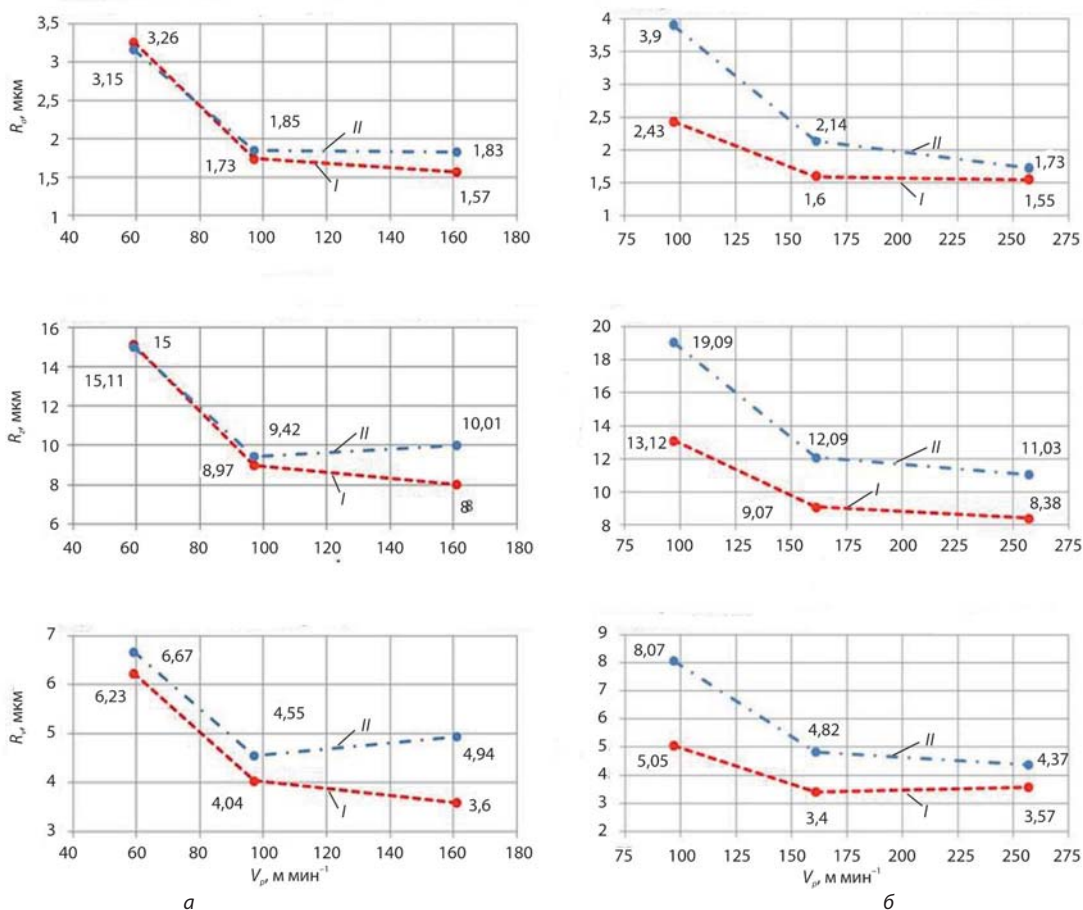


Рис. 4. Результаты измерений параметров шероховатости поверхности при сегментированной (I) и стандартной (II) обработке заготовки из стали 40X: а — режимы черновой обработки, подача $S_p = 0,21$ мм/об, глубина резания $t_p = 0,9$ мм; б — режимы полустойковой обработки, подача $S_p = 0,17$ мм/об, глубина резания $t_p = 0,6$ мм

и развитием автоколебательного процесса при механической обработке, способствующий ухудшению качества поверхности. Несмотря на возникновение автоколебаний в системе, характерна тенденция к улучшению шероховатости поверхности при использовании метода сегментированной обработки во всем диапазоне варьирования скорости резания и подачи $S_p = 0,1 \div 0,12 \div 0,17$ мм/об, но с определенной процентной долей эффективности. Выявлено, что на этапе полустойковой обработки в зависимости от изменения скорости резания $V_p = 257 \div 161 \div 97$ м/мин и постоянной подачи $S_p = 0,17$ мм/об параметр R_a снижается на 11 – 34 – 61 % от исходных значений, полученных при стандартной обработке. Соответственно показатель R_z улучшается на 13–45 %, максимальная глубина впадины профиля R_v — на 13–60 %.

Выводы

В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что предлагаемый метод предварительного воздействия концентрированным лазерным излучением на заготовку позволяет сформировать в поверхностном слое локальную сегментированную зону. Такой подход дает возможность для каждой операции механической обработки подбирать необходимую глубину изменения микроструктуры и механических свойств.

Последующие исследования подтвердили, что рассматриваемый метод управляемой сегментированной обработки позволяет улучшить качество поверхности изделия по нормированным параметрам шероховатости. В соответствии с полученными значениями R_a, R_z и R_v установлены следующие закономерности улучшения состояния поверхности. В первом случае на этапе черновой обработки положительный эффект от использования метода достигается при повышении скорости резания V_p и увеличении подачи S_p . Общее состояние поверхности заготовки по сравнению со стандартной обработкой по параметрам шероховатости улучшается на 18 %. Во втором случае при полустойковой обработке положительный эффект фиксируется при низких значениях скорости резания V_p , средней подаче S_p , снижении глубины резания t_p и сегментированной зоны t_m . Общий показатель состояния поверхности улучшается на 29 %.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что применение метода управляемой сегментированной механической обработки позволяет сократить число выполняемых операций и улучшить общее состояние качества поверхности изделия. В свою очередь, это обеспечит повышение производительности и эффективности изготовления изделий для горной отрасли промышленности. **ИМ**

Библиографический список

См. англ. блок

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 77-81
DOI: 10.17580/chm.2024.09.12

Improving the quality of processing articles made of low-alloy ferrite-pearlite steels using concentrated laser emission

Information about authors

A. E. Efimov, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering¹,
e-mail: Efimov_AE@pers.spmi.ru;

V. D. Uspenskaya, Student, Dept. of Mechanical Engineering¹,
e-mail: uspenskaya.vasilisa@yandex.ru;

A. A. Motrich, Student, Dept. of Mechanical Engineering¹, e-mail: motrich.2016@mail.ru
¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract: This article discusses issues related to improving the quality indicators of the surface products of mining industry made from low-alloy steel grade 40Kh. It is noted that the greatest influence on the formation of roughness is exerted by the destabilization of the treatment process, which is accompanied by the occurrence of self-oscillations. To solve this problem developed method of segmented machining. At the first stage, a segmented zone is formed in the surface layer of the workpiece using laser emission in order to modernize the original microstructure. At the second stage, the workpiece with a segmented zone is subjected the machining process. As a result of the machining process is activated the mechanism of reset and short-term reconfiguration of cutting conditions. The system's response to this mechanics is manifested in a change in the chip formation process, which is confirmed by high-speed video recording. It is found that when cutting 40Kh steel is resulting nucleation, fracture and crushing of continuous chip. This indicates changes in the chip formation process and stabilization of the turning operation. The effectiveness of the proposed method was assessed using the surface roughness parameters R_a , R_z , R_v . The conducted research has shown the following. At the stage of roughing and semi-finish operation, the general condition of the workpiece surface according to standardized roughness parameters improves by 18% and 29% respectively. The data obtained allow us to conclude that the application of the method of controlled segmented machining it possible to reduce the number of operations performed.

Key words: surface roughness; machinability by cutting; self-oscillations process; chip formation; segmented machining; laser emission; segmented zone; modernized structure.

References

- Bolobov V. I., Popov G. G. Methodology for testing pipeline steels for resistance to grooving corrosion. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7.
- Khatir F. A., Sadeghi M. H., Akar S. Investigation of surface integrity in the laser-assisted turning of AISI 4340 hardened steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 61. pp. 173–189. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.073.
- Brinksmeier E., Meyer D., Heinzl C. Process signatures - the missing link to predict surface integrity in machining. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 71. pp. 3–10. DOI: 10.1016/j.procir.2018.05.006.
- Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinik S. Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242, Iss. 2. pp. 228–233. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.
- Zhukov I. A., Golikov N. S., Martyushev N. V. Rationalization of the design of a scraper conveyor section by means of an automated method for analyzing strength characteristics. *Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy*. 2022. Vol. 14. No. 1 (51). pp. 142–150. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150.
- Fakir R., Barka N., Brousseau J., Caron-Guillemette G. Analysis of the mechanical behavior of AISI 4340 steel cylindrical specimens heat treated with fiber *Laser. Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 55. pp. 41–56. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.039.
- Maksarov V. V., Vasin S. A., Keksina A. I. Improving internal threaded surfaces in highly loaded components. *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. Iss. 10. pp. 944–947. DOI: 10.3103/S1068798X21100191.
- Kimakh K., Chouaf A., Aghzer S., Saoud A. Improvement of fatigue life of AISI 1045 carbon steel of parts obtained by turning process through feed rate. *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 9. pp. 243–249. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.06.039.
- Klevtsov V. A., Timofeev D. Y., Khalimonenko A. D. Improved design of manufacturing processes for mining machines: basing concepts. *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43 (11). pp. 1367–1375. DOI: 10.3103/S1068798X23110151.
- Keksina A. I., Sorokopud N. I., Zakirov N. N. Peculiarities of abrasive finishing of surfaces of parts made of aluminium alloy of AMts grade in magnetic field. *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*. 2024. Vol. 37. Iss. 06. pp. 1098–1105. DOI: 10.5829/ije.2024.37.06c.06.
- Stepanov S. N., Larionova T. A., Stepanov S. S. Study of the influence of aluminum on adhesion of stainless steel during flame spraying. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020. Vol. 245. pp. 591–598. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.11.
- Maksarov V. V., Minin A. O., Zakharova V. P. Ensuring surface quality in AIMg ites during high-frequency wave impact boring. *Tsvetnyye Metally*. 2023. No. 4. pp. 90–95.
- Dan Ö., Tormod J., Mathias T., Standal O. et al. Cutting process monitoring with an instrumented boring bar measuring cutting force and vibration. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 77. pp. 235–238. DOI: 10.1016/j.procir.2018.09.004.
- GOST 4513–71. Structural alloy steel bars. Specifications. Introduced: 01.01.1973.
- Vasin S. A., Vasiliev A. S., Plahotnikova E. V. Methods for assessing the technical compatibility of heterogeneous elements within a technical system. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243. pp. 329–336. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.329.
- Swain S., Panigrahi I., Sahoo A. K., Panda A. et al. Effect of tool vibration on flank wear and surface roughness during high-speed machining of 1040 steel. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020. Vol. 20. pp. 976–994. DOI: 10.1007/s11668-020-00905-x.
- Chun Liu, Min Wan, Yun Yang. Simulation of the chip morphology together with its evolution in machining of Inconel 718 by considering widely spread cutting speed. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 116. pp. 175–195. DOI: 10.1007/s00170-021-07346-2.
- Shelikhov E., Vasilevych S., Udalov A. The study of the dynamics of the cutting process of longitudinal turning of non-rigid shafts. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. pp. 2323–2328. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.680.
- Smirnov N. I., Drozdov A. N., Smirnov N. N. Tribodynamic aspects of the resource of electric submersible vane pumps for oil production. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 264. pp. 962–970.
- Zhang J., Liu Zh., Xu Ch. Modeling and prediction of cutting temperature in the machining of H13 hard steel of multi-layer coated cutting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 115. pp. 3731–3739. DOI: 10.21203/rs.3.rs-300796/v1.
- Vasilkov D. V., Cherdakova V. S., Bundur M. S. Modeling of contact interactions in lathe turning with accounts for rheology in the cutting zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1064, Iss. 1. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012041.
- You Q., Xiong J., Li H., Guo Z. et al. Study on the microstructure and high temperature friction and wear characteristics of three CVD coated cermets. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2021. Vol. 96. 105495. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105495.
- Bag R., Panda A., Sahoo A. K., Kumar R. Sustainable high-speed hard machining of AISI 4340 steel under dry environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. pp. 3073–3096. DOI: 10.1007/s13369-022-07094-9.
- Samarjit Swain, Sudeepta Chattarjee, Isham Panigrani, Ashok Kumar Sahoo. Cutting tool vibration analysis for better surface finish during dry turning of mild steel. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. p. 3. pp. 24605–24611. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.258.
- Chichenev N. A., Gorbatyuk S. M., Karfidov A. O., Nagovitsyn V. A. et al. Influence of laser radiation on the depth of hardened layer of tool steel cutting dies. *Metallurgist*. 2023. Vol. 67. pp. 1038–1042. DOI: 10.1007/s11015-023-01594-1.
- Jiang Q., Bertolo V. M., Popovich V., Sietsma J. et al. Microstructure-based cleavage modelling to study grain size refinement and simulated heat affected zones of S690 high strength steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 267. Iss. 19. 108432. DOI: 10.1016/j.engfract-mech.2022.108432.
- Chichenev N. A., Nagovitsyn V. A., Babali E. E. Influence of laser radiation on surface roughness of grade U8 steel blanking dies. *Steel in Translation*. 2023. Vol. 53. No. 1. pp. 68–73. DOI: 10.3103/S0967091223010023.
- Taylor C. M., Diaz F., Alegre R. Investigating the performance of 410, PH13-8Mo and 300M steels in a turning process with a focus on surface finish. *Materials & Design*. 2020. Vol. 195. 109062. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109062.
- Vasu M., Shivananda Nayaka H. Investigation of cutting force tool tip temperature and surface roughness during dry machining of spring steel. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, P. 2. pp. 7141–7149. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.379.
- Laser technologies of materials processing: modern issues of fundamental research and applied developments. Edited by V. Ya. Panchenko. Moscow: FIZMATLIT, 2009. 664 p.
- Xavierarockiaraja S., Kuppana P. Influence of process parameters on surface temperature during laser assisted preheating of SKD 11 steel based on response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 5. pp. 13451–13458. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.339.
- Zhendong S., Zhirong L., Jon A. S. On modelling of laser assisted machining: Forward and inverse problems for heat placement control. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2019. Vol. 138. pp. 36–50. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2018.12.001.
- Chichenev N. A., Vasilyev M. V., Karfidov A. O., Chicheneva O. N. The effect of laser hardening on the operation resistance of rolls of multi-roll mills and the quality of the rolling strip. *CS Iron and Steel Review*. 2023. Vol. 26. pp. 58–63.
- Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. Technological processes of laser processing: textbook. Moscow: Izdatelstvo MGTU imeni N. E. Bauman, 2006. 663 p.
- Muthukumar G., Dinesh Babu P. Laser transformation hardening of various steel grades using different laser types. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 43. Iss. 2. 103. DOI: 10.1007/s40430-021-02854-4.
- Ishkinyayev E. D., Khriptovich E. V., Voronov V. D., Petrovskiy V. N. et al. Determining the size of the hardening zone by temperature fields during laser processing. *Physics of Atomic Nuclei*. 2022. Vol. 85. pp. 2092–2098. DOI: 10.1134/S1063778822100210.
- Khalimonenko A. D., Timofeev D. Y., Golikov T. S. Cutting tool for turning large workpieces. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399. Iss. 4. 044082. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044082.
- Wei Ma, Fei Shuang. The plastic flow stability of chip materials in metal cutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 105. pp. 1933–1948. DOI: 10.1007/s00170-019-04353-2.
- Chao Zhang, Hongseok Choi. Study of segmented chip formation in cutting of high-strength lightweight alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 112. pp. 2683–2703. DOI: 10.1007/s00170-020-06057-4.
- Khalifa M., Duyun T. A. Simulation of the turning of AISI 4340 structural steel. *Russian Engineering Research*. 2022. Vol. 42. pp. 502–505. DOI: 10.3103/S1068798X22050173.