

Технологическое обеспечение качества поверхности заготовки на основе локального криогенного воздействия при обработке аустенитных сталей



В. В. Максаров,

декан механико-машиностроительного факультета¹, докт. техн. наук, профессор, эл. почта: maks78.54@mail.ru



Нгуен Ван Дао,

аспирант кафедры машиностроения¹, эл. почта: nguuyenvandao091097@gmail.com



А. Д. Халимоненко,

доцент кафедры машиностроения¹, канд. техн. наук, эл. почта: Khalimonenko_AD@pers.spmi.ru



П. В. Шишкин,

доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин¹, канд. техн. наук, эл. почта: shishkinp@mail.ru

Проведен анализ методов дробления стружки при обработке труднообрабатываемых материалов. Рассмотрен процесс резания заготовок из аустенитных сталей на основе предварительного локального криогенного воздействия на обрабатываемую поверхность с созданием упрочненной зоны с мелкозернистой структурой. Построена модель локального криогенного воздействия на обрабатываемые поверхности заготовок. Определены размерные параметры упрочненной зоны с мелкозернистой структурой, способствующей обеспечению устойчивого сегментирования и дробления сливной стружки, а также достижению высокого качества обработанных поверхностей заготовки после нанесения предварительного криогенного воздействия. Показано влияние криогенного воздействия на процесс обработки резанием аустенитных сталей.

Ключевые слова: аустенитная сталь, токарная обработка, стружкообразование, шероховатость поверхности, качество обработки, локальное криогенное воздействие, термический удар, жидкий азот.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.13

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

Введение

Аустенитные стали представляют собой основную группу коррозионностойких сталей, содержащие аустенит в качестве своей первичной структуры (γ -фаза железа), имеющий гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку. Наиболее распространенная аустенитная сталь содержит 18 % Cr и 8 % Ni, она немагнитна

и обладает хорошими эксплуатационными характеристиками: высокими пластичностью, коррозионной стойкостью во многих агрессивных окислительных средах, устойчивостью к механическому воздействию, хорошей деформируемостью и свариваемостью и др. [1]. Хромоникелевые аустенитные стали представлены отечественными марками 12X18H9T, 08X18H10T, 12X18H10T, 12X18H9, 17X18H9, 08X18H10, 03X18H11. В настоящее время коррозионностойкие

аустенитные высоколегированные стали имеют большое значение в машиностроении, находя широкое применение при изготовлении криогенных, коррозионностойких, жаропрочных, жаростойких изделий и деталей [2, 3].

Основной проблемой при обработке заготовок из материалов подобного класса является обеспечение высокого качества поверхности на высокопроизводительных режимах обработки, поэтому целью данной работы является повышение качества механической обработки изделий из аустенитных сталей, в том числе качества эксплуатационных поверхностей обработанных изделий, с применением нового метода криогенного воздействия на обрабатываемую поверхность.

Материал и методика исследования

Технологическое обеспечение качества поверхности заготовки при обработке аустенитных сталей

Для обеспечения высокого качества поверхности изделий из аустенитных сталей одной из основных задач является уменьшение величины шероховатости обработанных поверхностей. Однако аустенитная коррозионностойкая сталь относится к труднообрабатываемым материалам из-за ее низкой теплопроводности, высоких температур в зоне резания [4, 5] и склонности к наклепу, что сопровождается снижением скорости и устойчивости резания и образованием наростов на инструменте. При обработке такой стали резанием нужно обеспечить устойчивое сегментирование и дробление стружки, которая является сливной из-за высокой пластичной характеристики аустенитной стали [6]. Задача сегментирования и дробления стружки взаимосвязана с вопросами качества, производительности обработки, хранения и транспортировки отходов производства, а также возможного травматизма рабочего персонала [7–9]. В настоящее время существуют несколько методов для дробления стружки, основными из которых являются:

- дробление стружки путем воздействия непосредственно на нее, например отвод стружки ручным инструментом, применение стружкоотводчиков, режущих инструментов со сменными твердосплавными пластинами и др. [10];
- дробление стружки за счет воздействия на режущий инструмент, например обработка с вибрациями (низко- и высокочастотными), комплексное применение стружколомающей геометрии инструмента [11–13];
- воздействие на заготовку перед обработкой, например методы глобального воздействия (способ растяжения заготовки с целью создания в поверхностном слое напряжений) и предварительного локального воздействия (физико-химическое и механическое воздействие) [14–16].

В настоящее время при токарной обработке аустенитных сталей для дробления стружки широко применяют методы предварительного локального воздействия, обеспечивающие высокое качество работы как на обычных режимах резания, так и на высокопроизводительных. Суть методов заключается в создании в поверхностном слое заготовки узкой упрочненной зоны с измененными физико-механическими свойствами по сравнению с исходным материалом. При обработке заготовок, подвергнутых такому воздействию, происходит периодическое изменение условий резания в упрочненной зоне, что приводит к обеспечению сегментации и дроблению стружки [17]. Предварительное локальное воздействие можно разделить на два

типа — физико-химическое и механическое. Существуют несколько известных методов локального воздействия: создание канавки на обрабатываемой поверхности заготовки режущим инструментом перед зоной резания; термическое воздействие источником нагрева или электроконтактом; пластическое, лазерное или индукционное воздействие и др. [18, 19].

Проведенные экспериментальные исследования использования рассматриваемых методов показали, что их применение при чистовой токарной обработке коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса не эффективно. Эти методы создают большие нагрузки на режущий инструмент и вызывают рост автоколебаний в процессе резания, что приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности, повышению износа режущего инструмента и снижению общей производительности [20–22].

Для достижения высокого качества при чистовом точении аустенитных сталей в данной работе применяли криогенное воздействие на обрабатываемую поверхность. Метод предварительного локального криогенного воздействия (ЛКВ) заключается в том, что при низких температурах в легированных и углеродистых сталях и сплавах происходит упрочнение поверхностного слоя [23–25], что способствует изменению механических свойств материала в локальной зоне в результате термического удара холодом и создает необходимые условия для их резания.

Метод предварительного локального криогенного воздействия основан на создании упрочненной зоны на поверхности заготовки при помощи специального устройства (рис. 1), подающего жидкий азот в зону обработки перед осуществлением процесса резания. При пересечении плоскости резания этой упрочненной зоны с измененными свойствами возникает концентратор напряжений [26–28]. При достижении высокого напряженно-деформационного состояния образующаяся сливная стружка сама сегментируется и дробится. Периодическое изменение условий резания приводит к созданию

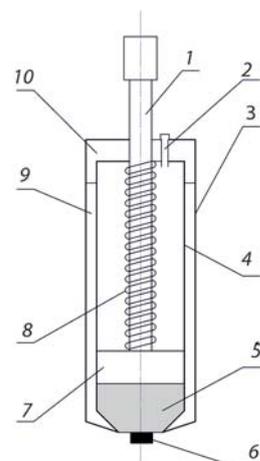


Рис. 1. Устройство для подачи жидкого азота:
 1 — шток; 2 — отверстие для подачи сжатого воздуха, предназначенного для осуществления поступательного движения штока и поршня; 3 — внешний корпус устройства; 4 — внутренний корпус устройства, изготовленный из коррозионностойкой стали; 5 — камера с жидким азотом; 6 — контактный элемент, состоящий из волокнистого стержня из фетра или другого пористого материала, вставленного в корпус устройства; 7 — поршень для подачи жидкого азота из камеры; 8 — пружина для возвратного поступательного движения штока и поршня; 9 — вакуум для изоляции температурного воздействия от внешней среды; 10 — крышка устройства

равных сегментов сливной стружки, а также к удалению нароста на режущем инструменте, и, следовательно, к снижению значений шероховатости обработанной поверхности при чистовой обработке аустенитной стали [29].

При механической обработке заготовки из аустенитной стали путем предварительного ЛКВ необходимо следить за размером упрочненной зоны, который способствует управлению процессом устойчивого сегментирования и дробления стружки на равные отрезки в заданных режимах резания.

Для реализации метода предварительного ЛКВ создано специальное устройство для подачи жидкого азота на обрабатываемую поверхность заготовки (рис. 2).

На первом этапе жидкий азот передается из сосуда Дьюара в камеру устройства подачи жидкого азота 7 с помощью переливного устройства 5. На стадии предварительной технологической подготовки устройство устанавливают на резцедержателе токарного станка 3 и подводят к обрабатываемой поверхности заготовки 1 так, чтобы контактный элемент коснулся этой поверхности. Баллон со сжатым воздухом 4 подает его через отверстия устройства, под давлением которого шток с пружиной (см. рис. 1) перемещается вперед и выталкивает жидкий азот 9 через контактный элемент 8 из камеры на обрабатываемую поверхность заготовки, нанося на нее локальное криогенное воздействие. Устройство перемещают в режиме продольной подачи $S_{ЛКВ}$ вдоль заготовки и создают прямую линию зоны ЛКВ, которую можно создать также в виде винтовой линии, если заготовке придать вращение с частотой n , или в виде нескольких прямых линий при периодическом повороте шпинделя после нанесения первой линии. Между обрабатываемой поверхностью 1 и контактным элементом 8 имеется зазор Δ , размер которого определяют минимальным расстоянием, препятствующим растеканию жидкого азота по обрабатываемой поверхности, и шириной зоны ЛКВ. Ширину b_m и глубину h_m этой зоны определяют величиной длительности контакта между обрабатываемой поверхностью заготовки и контактным элементом устройства подачи жидкого азота. Для обеспечения высокого качества обработанной поверхности изделий из аустенитных сталей необходимо подобрать режимные параметры (скорость подачи устройства для нанесения криогенного воздействия $V_{ЛКВ}$; давление в устройстве для подачи жидкого азота $P_{ЛКВ}$;

длительность контакта между обрабатываемой поверхностью и контактным элементом устройства для подачи жидкого азота $t_{ЛКВ}$) так, чтобы глубина упрочненной зоны достигала необходимого значения для обеспечения устойчивого сегментирования образующей стружки. Для оценки величины упрочненной зоны на поверхности обрабатываемого изделия использовали металлографический метод с помощью образцов-свидетелей, на которых при тех же режимах, что и на заготовке, осуществляли криогенное воздействие. На образцах-свидетелях подготовили шлифы (рис. 3), провели металлографические исследования, позволившие установить для различных режимных параметров и продолжительности криогенного воздействия величины локальных зон h_m и b_m .

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние ЛКВ исследовали при обработке заготовок типа «тело вращения» из аустенитной стали марки 12X18H10T диаметром $D_3 = 50$ мм, режущей пластиной марки Т5К10 с геометрическими параметрами: передний угол $\gamma = 5$ град., задний угол $\alpha = 7$ град. на черновой, получистовой и чистовой операциях. Длительность контакта между обрабатываемой поверхностью и контактным элементом устройства для подачи жидкого азота варьировали от 30 с до 3 мин с шагом 30 с, в результате чего полученные глубины метастабильной структуры изменялись от 0,1 до 0,75 мм.

В результате проведения экспериментов установили, что глубина упрочненной зоны не должна превышать глубину резания, чтобы не оказывать отрицательного влияния на последующую обрабатываемую поверхность после каждой операции обработки (черновой, получистовой и чистовой).

На основании результатов экспериментальных исследований построили схему расположения допусков и припусков с назначенными глубинами упрочненной мелкозернистой структуры (см. рис. 3, зона 2) при механической обработке аустенитной стали марки 12X18H10T на основе ЛКВ (рис. 4).

При обычной чистовой обработке заготовки из аустенитной стали марки 12X18H10T значение шероховатости $R_a = 1,6$ мкм, а при чистовой обработке с предварительным ЛКВ $R_a = 0,63$ мкм, т. е. уменьшается почти в 2 раза. Таким образом, можно отметить, что метод локального криогенного воздействия эффективен для обработки изделий из сталей аустенитного класса.

В процессе механической обработки заготовки 1 (см. рис. 2) с полученной на ее обрабатываемой поверхности упрочненной мелкозернистой структурой придают вращение с частотой n , в результате чего происходит срез слоя металла режущим инструментом 2 на глубину резания.

Процесс механической обработки с образованием стружки является сложным физическим процессом, так как сопровождается различными физико-механическими явлениями: упругими и пластическими деформационными процессами; большим трением между поверхностями заготовки и режущим инструментом; тепловыделением в зоне резания; наростообразованием; завиванием и усадкой стружки; повышением твердости деформируемых слоев металла; автоколебаниями технологической системы [30–32]. Кроме того, на процесс

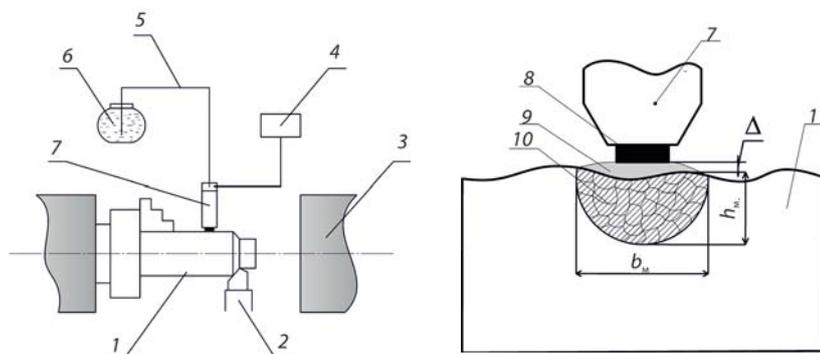


Рис. 2. Схема нанесения локального криогенного воздействия при помощи устройства для подачи жидкого азота на обрабатываемую поверхность заготовки: 1 — заготовка; 2 — режущий инструмент; 3 — станок; 4 — баллон со сжатым воздухом; 5 — переливное устройство; 6 — сосуд Дьюара; 7 — устройство подачи жидкого азота; 8 — контактный элемент; 9 — жидкий азот; 10 — метастабильная структура

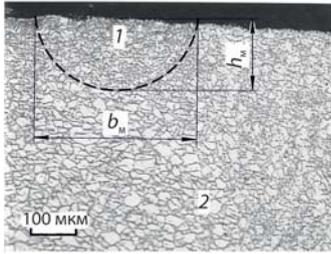


Рис. 3. Шлиф со следом локального криогенного воздействия: 1 — исходная структура аустенитной стали марки 08X18H10T; 2 — зона локального криогенного воздействия

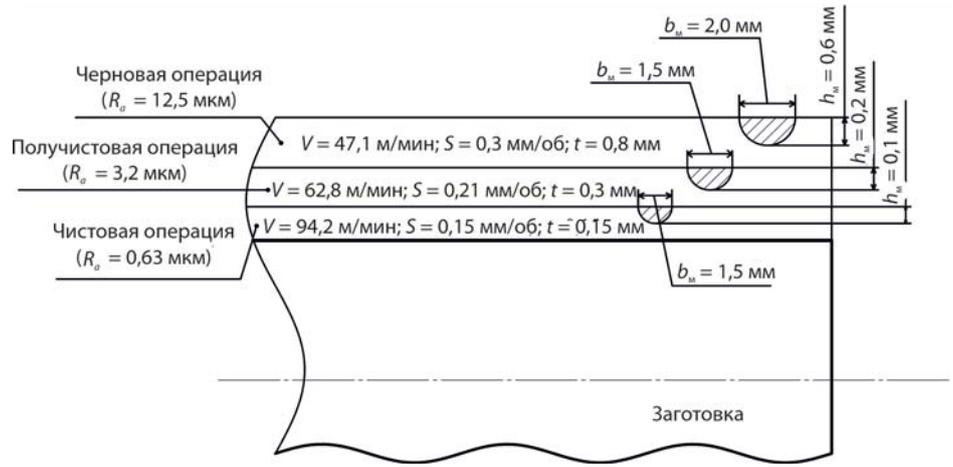


Рис. 4. Схема расположения допусков и припусков с назначенными глубинами упрочненной мелкозернистой структуры

стружкообразования оказывают влияние параметры обработки: толщина срезаемого слоя материала; подача S ; скорость резания V и геометрия инструмента резания [33–35].

Под действием силы резания P_z , образующейся в результате сжатия металла срезаемого слоя при вхождении в него режущего инструмента, в обрабатываемой заготовке в зоне стружкообразования создается напряженное состояние, что обеспечивает удаление ее поверхностного слоя. Частицы металла при вхождении в начальную границу стружкообразования получают начальное пластическое деформирование, а затем это пластическое деформирование увеличивается при переходе в конечную зону стружкообразования, в которой частицы получают наибольшую деформацию (рис. 5, а). При этом на поверхности наибольших сдвигов происходит сдвиг зерен относительно друг друга под углом скольжения β_2 , следовательно, срезаемый слой толщиной t переходит в стружку толщиной $a_{стр}$. Углом β_1 обозначен угол сдвига. Чем больше скорость резания, тем меньше угол резания (больше передний угол) и чем тверже обрабатываемый материал, тем больше угол сдвига β_1 .

При механической обработке заготовки из аустенитной стали путем предварительного криогенного воздействия жидким азотом происходят периодические изменения условия резания.

На поверхности заготовки, подвергающейся локальным криогенным воздействиям за счет термического удара, происходят локальное упрочнение и уменьшение размера зерна (см. рис. 3), что приводит к изменению свойств самого металла и, следовательно, к изменению углов β_1, β_2 . Это объясняется тем, что при вхождении режущего клина в зону локального криогенного воздействия условная плоскость сдвига изменяет свой наклон, что приводит к изменению угла β_1 и, соответственно, изменению значения угла θ . Аналогичные изменения происходят при выходе режущего клина из зоны локального криогенного воздействия, но только в противоположном направлении. Таким образом, можно сделать вывод, что скорость и величина изменения угла θ_1 способствуют обеспечению сегментирования сливной стружки в процессе резания с предварительным локальным криогенным воздействием на обрабатываемый материал. При точении заготовки из аустенитной стали, подвергнутой предварительному локальному криогенному воздействию, возникают особенности стружкообразования, присущие только предварительной обработке такой заготовки. Выявление физической природы процесса стружкообразования на основе ЛКВ и связанных с ним закономерностей позволит получить обработанные поверхности более высокого качества.

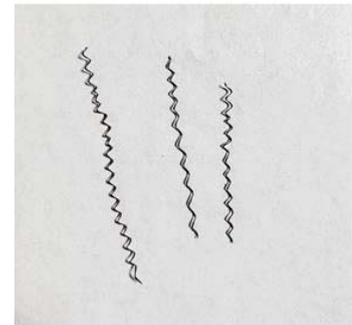
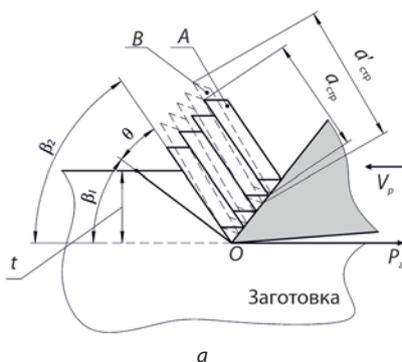


Рис. 5. Стружкообразование: а — формирование сдвиговых деформаций; б — при обычном резании; в — при резании с локальным криогенным воздействием; А, В — стружка при обычном резании и при резании с ЛКВ соответственно; P_z, v_p — сила и скорость резания соответственно; $a_{стр}, a'_{стр}$ — толщина стружки при обычном резании и при резании с ЛКВ соответственно; β_1, β_2 — угол сдвига и угол скольжения деформаций соответственно

Заклучение

1. Анализ проведенных в данной области исследований позволил установить, что применение существующих методов дробления стружки при механической обработке деталей типа «тело вращения» из аустенитных сталей является не эффективным для чистовой токарной обработки коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса. Из-за высокой вязкости аустенитных сталей при обработке деталей возникают автоколебания и наростообразования, что приводит к увеличению значений шероховатости обработанной поверхности и уменьшению качества обработки.

2. Анализ влияния низких температур (температура жидкого азота составляет $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) на структуру аустенитных сталей и методов локального воздействия позволил разработать и реализовать метод обработки резанием деталей типа «тело вращения» из аустенитных сталей, который основан на ЛКВ жидким азотом обрабатываемой поверхности перед резанием. При воздействии низких температур на обрабатываемые поверхности заготовки происходит локальное упрочнение за счет термического удара.

3. Применение специальной установки для осуществления предварительного ЛКВ жидким азотом на обрабатываемую поверхность позволяет сформировать упрочненную зону с мелкозернистой структурой на ее поверхностном слое.

4. Периодическое изменение условий резания при пересечении плоскости резания и упрочненной зоны способствует обеспечению устойчивого сегментирования и дробления сливной стружки, что приводит к уменьшению значений шероховатости обработанной поверхности с $R_a = 1,6\text{ мкм}$ при обычном точении до $R_a = 0,63\text{ мкм}$ при точении с ЛКВ; препятствует наростообразованию, снижает силовые нагрузки и автоколебания, воздействующие на режущий клин инструмента. В результате уменьшается износ режущего инструмента, повышается качество обработки и ее общая производительность.

Библиографический список

См. англ. блок

“Chernye metally”, 2024, No. 9, pp. 82–87
DOI: 10.17580/chm.2024.09.13

Technological support of workpiece surface quality based on local cryogenic impact during processing of austenitic steels

Information about authors

V. V. Maksarov, Dr. Eng., Prof., Dean of the Faculty of Mechanical Engineering¹, e-mail: maks78.54@mail.ru;

Nguyen Van Dao, Postgraduate Student, Dept. of Mechanical Engineering¹, e-mail: nguyenvandao091097@gmail.com;

A. D. Khalimonenko, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Mechanical Engineering¹, e-mail: Khalimonenko_AD@pers.spmi.ru;

P. V. Shishkin, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Transport and Technological Processes and Machines¹, e-mail: shishkinp@mail.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

Abstract: An analysis of methods for crushing chips when processing difficult-to-cut materials was carried out. The process of cutting workpieces from austenitic steels is considered based on preliminary local cryogenic action on the surface being processed with the creation of a strengthened zone with a fine-grained structure. A model for the implementation of local cryogenic effects on the processed surfaces of workpieces has been constructed. The dimensional parameters of the hardened zone with a fine-grained structure have been determined, which helps ensure stable segmentation and crushing of drain chips, as well as achieving high quality of machined surfaces of the workpiece after applying a preliminary cryogenic effect. The influence of cryogenic exposure on the processing of austenitic steels is shown.

Key words: austenitic steel, turning, chip formation, surface roughness, processing quality, local cryogenic exposure, liquid nitrogen.

References

- Kumar A., Sharma R., Kumar S., Verma P. A review on machining performance of AISI 304 steel. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 56, Iss. 6. pp. 2945–2951. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.003.
- Milyuts V. G., Tsukanov V. V., Pryanin E. I., Nikitina L. B. Development of manufacturing technology for high-strength hull steel reducing production cycle and providing high-quality sheets. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. p. 536. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.536.
- Ermakov S. B., Ermakov B. S., Vologzhanina S. A., Sleptsov O. I. Investigation of material properties for cryogenic products, produced by additive manufacturing techniques. *Metallurgist*. 2023. Vol. 67, Iss. 5–6. pp. 644–651. DOI: 10.1007/s11015-023-01552-x.
- Pryanin E. I., Sharapova D. M. Understanding the structure and properties of the heat affected zone in welds and model specimens of high-strength low-alloy steels after simulated heat cycles. *IS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. pp. 60–65.
- Kukharova T. V., Ilyushin Y. V., Asadulagi M. A. M. Investigation of the OA-300M electrolysis cell temperature field of metallurgical production. *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 23. 9001. DOI: 10.3390/en15239001.

- Gorbunov O. I., Maksarov V. V., Olt Yu. Automation and control of the chip breaking process of the processed material of the austenitic class under preliminary cryogenic action. *Metalloobrabotka*. 2009. No. 3 (51). pp. 48–54.
- Karabulut Ş., Güllü A., Yılmaz B. A review of the chip breaking methods for continuous chips in turning. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 49. pp. 50–69. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.026.
- Pacella M. A new low-feed chip breaking tool and its effect on chip morphology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 104, Iss. 1–4. pp. 1145–1157. DOI: 10.1007/s00170-019-03961-2.
- Khrustaleva I. N., Lyubomudrov S. A., Larionova T. A., Brovkina Ya. Yu. Improving the efficiency of technological preparation for production of components for manufacture of mineral resource complex equipment. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021. Vol. 249. pp. 417–426. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.11.
- Artamonov E. V., Vasiliev D. V., Chernyshov M. O. Chip breaking during automated cutting of difficult-to-machine steels by means of complex application of chip-breaking tool and high-temperature embrittlement. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020. Vol. 24 (1). pp. 8–22. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-8-22.
- Schwarze M., Rüger C., Georgi O., Rentsch H. et al. Actuator and process development for vibration assisted turning of steel. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2021. Vol. 15. pp. 64–69. DOI: 10.3233/ATDE210013.
- Tej Patel, Sahitya Yadav, Zeel Raj, Prassan Shah et al. Analysis of machining performance of AISI 420 stainless steel using conventional and ultrasonic assisted turning. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 26. pp. 2200–2207. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.478.
- Yingshuai Xu, Zhihui Wan, Ping Zou, Qinjian Zhang. Experimental study on chip shape in ultrasonic vibration-assisted turning of 304 austenitic stainless steel. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 11, Iss. 8. DOI: 10.1177/1687814019870896.
- Kim Jun-Hwan, Kim Eun-Jung, Lee Choon-Man. A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 57, Iss. 5. pp. 499–508. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.013.
- Zhu J.-N., Zhu W., Borisov E., Hermans M. et al. Effect of heat treatment on microstructure and functional properties of additively manufactured NiTi shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 967. 171740. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171740.
- Bezyazychnyi V., Szczek M. Thermal processes research development in machine-building technology. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 232. pp. 395–400. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.395.
- Stampfer B., Bachmann J., Gauder D., Böttger D. et al. Modeling of surface hardening and roughness induced by turning AISI 4140 QT under different machining conditions. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 108, Iss. 1–2. pp. 293–298. DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.050.
- Bazhin V. Y., Issa B. Influence of heat treatment on the microstructure of steel coils of a heating tube furnace. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249. pp. 393–400. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.8.
- Volokitina I., Siziakova E., Fediuk R., Kolesnikov A. Development of a thermomechanical treatment mode for stainless-steel rings. *Materials*. 2022. Vol. 15, Iss. 14. 4930. DOI: 10.3390/ma15144930.

20. Arzoo M. Z., Hassan M., Gupta N. A comparison study between conventional and cryogenic machining. *Innovations in Mechanical Engineering*. 2022. pp. 329–337. DOI: 10.1007/978-981-16-7282-8_22.
21. Che Hassan Che Haron, Shalina Sheik Muhamad, Jaharah A. Ghani. A review on future implementation of cryogenic machining in manufacturing industry. *Progress in Industrial Ecology An International Journal*. 2018. Vol. 12. Iss. 3. pp. 260–283. DOI: 10.1504/PIE.2018.10018040.
22. Quanxin Jiang, Virginia M. Bertolo, Vera Popovich, Jilt Sietsma 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.engfracmech.2022.108432.
23. Vologzhanina S. A., Ermakov S. B., Ermakov B. S., Sleptsov O. I. Study of properties of materials for cryogenic purpose articles obtained by additive technologies. *Metallurg*. 2023. No. 5. pp. 67–72.
24. Mayer P., Kirsch B., Müller C., Hotz H. et al. Deformation induced hardening when cryogenic turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018. Vol. 23. pp. 6–19. DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.10.003.
25. Hotz H., Kirsch B., Zhu Tong, Smaga M. et al. Surface layer hardening of metastable austenitic steel e Comparison of shot peening and cryogenic turning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 6. pp. 16410–16422. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.109.
26. Aurich J. C., Patrick M., Benjamin K., Eifler D. et al. Characterization of deformation induced surface hardening during cryogenic turning of AISI 347. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 63. Iss. 1. pp. 65–68. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.079.
27. Wang Bo, Hong Chuanshi, Winther G., Christiansen T. L. et al. Deformation mechanisms in meta-stable and nitrogen-stabilized austenitic stainless steel during severe surface deformation. *Materialia*. 2020. Vol. 12. 100751. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100751.
28. Vologzhanina S., Igolkin A., Peregudov A., Baranov I. et al. Effect of the deformation degree at low temperatures on the phase transformations and properties of metastable austenitic steels. *Obrabotka Metallov*. 2022. Vol. 24. Iss. 1. pp. 73–86. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-73-86.
29. Maksarov V. V., Nguyen V. D., Efimov A. E., Brigadnov I. A. Technological support of the quality of operational surfaces of a workpiece made of austenitic steels. *Metallrobrabotka*. 2023. No. 1 (133). pp. 47–54. DOI: 10.25960/mo.2023.1.47.
30. Ershov D. Y., Lukyanenko N., Zlotnikov E. G. Dynamic properties of technological drive operating in acceleration mode. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 232. pp. 323–333. DOI: 10.1007/978-981-16-2614-6_28.
31. Pompeev K. P., Timofeev D. Yu. Precision dimensional analysis in CAD design of reliable technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*. 2018. Vol. 194. Iss. 2. 022028. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022028.
32. Keksin 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.
33. Yu Su, Guoyong Zhao, Yugang Zhao, Jianbing Meng et al. Multi-objective optimization of cutting parameters in turning AISI 304 austenitic stainless steel. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*. 2020. Vol. 10. Iss. 2. 217. DOI: 10.3390/met10020217.
34. V. Durga Prasad Rao, Sk. R. S. Mahaboob Ali, Sk. M. Z. M. Saqheed Ali, V. Navya Geethika. Multi-objective optimization of cutting parameters in CNC turning of stainless steel 304 with TiAlN nano coated tool. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. Iss. 12. pp. 25789–25797.
35. Kuntoglu M., Acar O., Gupta M. K., Saglam H. et al. Parametric optimization for cutting forces and material removal rate in the turning of AISI 5140. *Machines*. 2021. Vol. 9. Iss. 90. pp. 1–21. DOI: 10.3390/machines9050090.



6-й Международный семинар «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии»



1–2 октября 2024 г.

Москва, Алтуфьевское шоссе, д.79А, строение 2

Семинар посвящен проблемам, связанным с развитием управления и автоматизации технологическими процессами в условиях глобальной трансформации минерально-сырьевого комплекса в области обогатительных и металлургических процессов.

Организаторы: Акционерное общество «Союзцветметавтоматика им. Толчаева В. П.» (АО «СоюзЦМА»), Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (кафедра автоматизации технологических процессов и производств) и Издательский дом «Руда и Металлы».

Цель – установление научно-практических связей и сотрудничества между крупными отечественными и международными специалистами в области автоматизации технологических процессов и производств.

Задачи мероприятия

- Обмен положительным опытом и мнениями между специалистами по автоматизации различных международных компаний.
- Укрепление и развитие отношений между производством, отраслевой наукой и университетской средой.
- Выполнение совместных проектов для горно-обогатительных фабрик и металлургических заводов.
- Развитие совместной публикационной деятельности.
- Участие в научных грантах, выполнение научных договоров в области цифровых автоматизированных комплексов в обогащении и металлургии.
- Содействие вопросам подготовки кадров в целях устойчивого развития.

Тематика докладов семинара

- ◆ Новые требования по экономической оценке научно-технических разработок и инженерных услуг.
- ◆ Контрольно-измерительная система теплового режима литейно-прокатного комплекса.
- ◆ Цифровые автоматизированные комплексы в сложных гидрометаллургических системах.
- ◆ Использование микропроцессорной техники на обогатительных фабриках металлургии.
- ◆ Оптические методы контроля в области переработки полиметаллических руд.
- ◆ Цифровые двойники в металлургических процессах как основной элемент современной АСУ ТП.
- ◆ Новые приборы технологического и экологического контроля производства.
- ◆ Комбинированные автоматизированные измерительные устройства на базе различных контроллеров

В мероприятии примут участие ведущие специалисты компаний, преподаватели и аспиранты.

Контакты организаторов:

+ 7 (499) 489-14-09, + 7(499) 489-10-85, scma@scma.ru

Информационная поддержка:
Издательский дом «Руда и Металлы» 