

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В.А. Батыев, В.В. Батыев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В мировой практике находят все большее применение прогрессивные технологии обработки микродеталей. К таким технологиям относится микрошлифование. Микрошлифование позволяет обрабатывать мелкие детали с высокой производительностью и чистотой поверхности. Микрошлифование имеет преимущество перед другими процессами изготовления микродеталей, поскольку обеспечивает очень высокую шероховатость поверхности и минимальные заусенцы. Анализ литературных источников показал, что большинство работ направлены на исследование обработки таких материалов, как стекло, кремний, АД33, АД35, из-за широкой области их применения. Все работы, связанные с обработкой легированных сталей, носят эмпирический характер и заключались в подборе оптимальных режимов резания. Таким образом, универсальные технологии процесса микрошлифования, направленные на обработку деталей, отсутствуют, а технологию обработки конкретной детали из конкретного материала необходимо разрабатывать, основываясь на базовых понятиях «технологии машиностроения» и совершенствовать путем анализа эмпирических данных.

В рамках данной работы проводились экспериментальные исследования возможности обработки детали из стали 40ХН2МА методом микрошлифования. Для проведения исследования был собран экспериментальный стенд на базе вертикально-фрезерного станка EMCOMILL 300, оснащенного высокоскоростным пневматическим шпинделем HTS1501S. В качестве режущего инструмента выбран бур фирмы Nakanishi диаметром 1,2 мм. На стенде последовательно обрабатывались заготовки с термообработкой и без нее.

В результате исследования определена технологическая возможность и эффективность обработки детали из стали 40ХН2МА методом микрошлифования на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ с помощью высокоскоростного пневматического шпинделя и инструмента из кубического нитрида бора (CBN).

Ключевые слова: микрошлифование, микромеханическая обработка, высокоскоростная обработка.

Введение. В последние годы мировой рынок микродеталей и микрокомпонентов показывал значительную динамику роста. Данные темпы роста связаны с преимуществами микродеталей по функциональной точности, весу, с эксплуатационными возможностями [1]. Вместе с этим миниатюризация деталей позволяет снизить их стоимость, потребление энергии и ресурсов в процессе производства и эксплуатации [2].

Также в промышленности увеличивается производство изделий, состоящих из микродеталей и микрокомпонентов или набора сложных поверхностей, которые можно получить только методом микрообработки. Это связано с переходом на современные полифункциональные изделия, конструкции которых обладают значительной сложностью, и к которым предъявляют жесткие требования к размеру, весу, условиям эксплуатации и надежности. Такие изделия получили распространение в таких областях, как медицина, авто- и авиастроение, оптическая промышленность, приборостроение и микроэлектроника [3].

Необходимость осуществлять обработку микродеталей вызвала развитие технологий микро- и прецизионной обработки. К таким технологиям относятся: абразивная обработка со снятием стружки (механическая и абразивная, алмазное микрорезание); нетрадиционная обработка (электроэрозионная, лазерная, ультразвуковая, струйная); литье и прессование в пресс-формах, объ-

емная электрохимическая обработка и др. [4]. Эти технологии основаны на разных физических принципах и их применение в каждом конкретном случае определяется материалом, заданными геометрическими, размерными и качественными параметрами.

При изготовлении деталей, имеющих высокие технические требования по точности размеров и формы, а также твердости материала, широко используется микрошлифование [5]. Данная технология позволяет обрабатывать поверхности пространственно-сложной формы, которые невозможно получить при использовании физико-химических методов, сократить нагрузку на режущий инструмент и повысить качество обрабатываемой поверхности по сравнению с микрофрезерованием [6, 7].

В мировой практике необходимость в производстве микродеталей привела к росту производственных технологий, способных обеспечить заданную точность и шероховатость. К таким технологиям относятся: абразивная обработка со снятием стружки (механическая и абразивная, алмазное микрорезание); нетрадиционная обработка (электроэрозионная, лазерная, ультразвуковая, струйная); литье и прессование в пресс-формах, объемная электрохимическая обработка и др. [4]. Из всех этих способов можно выделить микрошлифование, способное обрабатывать мелкие детали с высокой производительностью и чистотой поверхности. Микрошлифование является прогрессивным способом получения особо точных деталей или компонентов из практически любого материала, поддающегося механической обработке [7, 8], и имеет преимущество перед другими процессами изготовления микродеталей, поскольку обычно используется для чистовой обработки и обеспечивает очень высокую шероховатость поверхности. Наиболее важным преимуществом микрошлифования является минимизация образования заусенцев в значительной степени, что является основной проблемой, связанной с механической микрообработкой [7].

Анализ литературных источников показал, что большинство исследователей сосредоточились на исследовании обработки таких материалов, как стекло, кремний, Al-6061(АД33, АД35), из-за широкой области их применения.

Однако некоторые исследования были направлены и на изучение обрабатываемости и физических процессов при обработке легированных сталей. Например, в работах [9–11] рассмотрены теплофизические особенности процесса микрошлифования при обработке нержавеющей стали STS 304 (08X18H10) и инструментальной стали SK-41C шлифовальным кругом из кубического нитрида бора (CBN). Но исследования носили эмпирический характер и заключались в определении оптимальных режимов резания, подборе или изготовлении режущего инструмента для обработки конкретных материалов.

В литературе [12] предлагается два основных способа применения микрошлифования: финишная обработка после микрофрезерования для удаления заусенцев, улучшения шероховатости, и как самостоятельный способ обработки – вышлифовывание различных элементов трехмерной геометрии в заготовке без предварительной механической обработки. Однако эти рекомендации носят условный характер, и окончательное решение основывается на субъективном опыте технолога.

Таким образом, универсальные технологии процесса микрошлифования, направленные на обработку деталей из той или иной группы материалов, отсутствуют, а технологию обработки конкретной детали из конкретного материала необходимо разрабатывать, основываясь на базовых понятиях «технологии машиностроения», и совершенствовать путем анализа эмпирических данных.

Целью данной работы является разработка опытной технологии изготовления гайки ШВП методом микрошлифования.

1. Планирование эксперимента. Микрошлифование имеет те же аспекты, что и обычное шлифование, но относится к области микромеханической обработки. В отличие от традиционной модели резания, при которой шлифование рассматривается как массив зерен с острой кромкой, расположенных на линии соприкосновения шлифовального круга и заготовки, при микрообработке стружкообразование происходит вдоль закругленной кромки инструмента [13–15]. Значение радиуса режущей кромки инструмента ограничено методом изготовления микроинструмента и считается основной причиной минимальной толщины стружки [16]. Также радиус кромки инструмента является критическим параметром при микрообработке, который может иметь огромное влияние на шероховатость поверхности, возникающие силы, износ инструмента и тепловые процессы, происходящие в зоне резания [17–19].

Инструмент для микрошлифования разделяют на обычный и суперабразивный [20]. К обычным абразивам относят инструмент из оксида алюминия и карбидов кремния. Инструментом из обычного абразива обрабатывают такие металлы, как углеродистая, легированная, быстрорежущая стали, отожженный ковкий чугун, кованое железо и т. д. Данный инструмент имеет значительные преимущества по стоимости и применяемости, но недостаточная стойкость делает его применение затруднительным в качестве мерного инструмента, обеспечивающего своим профилем профиль обрабатываемой поверхности.

Суперабразивы (CBN и алмаз) используют для обработки цветных и черных металлов, титановых сплавов. Также суперабразивы используют для замены обычного абразивного инструмента при обработке закаленной стали с твердостью больше 35 HRC [20], поскольку они показывают большую стойкость (примерно в 4 раза). Высокая теплопроводность суперабразивов предотвращает такие негативные моменты в процессе шлифования как прижоги. Вместе с этим в условиях высоких температур при обработке сталей предпочтительно применение CBN, поскольку алмаз из-за сходства химического состава растворяется в железе.

Таким образом, для проводимого исследования наиболее предпочтителен инструмент из CBN, так как он обладает высокой стойкостью, что важно с точки зрения формирования окончательного профиля, и может обрабатывать детали, как с высокой вязкостью, так и с высокой твердостью (> 35 HRC).

Процесс микрошлифования связан с обработкой деталей размерами 10–2000 мкм [1]. Для достижения такой размерной точности необходимо оборудования с высокой точностью позиционирования (менее 2 мкм). Поэтому прецизионные станки играют важную роль в реализации процесса микрошлифования, поскольку они напрямую определяют точность обработки, производительность, технологичность и повторяемость размеров.

Вместе с этим из-за малого диаметра инструмента (менее 1 мм) для обеспечения процесса резания необходима возможность достижения частоты вращения шпинделя более 100 000 об/мин.

В настоящее время на рынке представлен большой выбор оборудования для микрообработки, например, станки компаний, MAKINO, WALTER, SIEMENS и др. Однако вместе с высокими техническими характеристиками данное оборудование имеет высокую стоимость.

В ряде работ [5, 7, 10] предлагается использовать съемный высокоскоростной шпиндель для исследования процесса микрообработки. Высокоскоростной шпиндель монтируется на станочное оборудование с ЧПУ и позволяет обеспечить необходимую частоту вращения режущего инструмента и минимизирует затраты на исследование процесса микрошлифования.

Высокоскоростные шпиндели различаются по типу привода на электрические и пневматические. Электрические шпиндели обеспечивают частоту вращения порядка 100 000 об/мин. Пневматические шпиндели позволяют достичь больших скоростей, чем электрические – порядка 150 000 об/мин, однако частота вращения не регулируется. Кроме того, в конструкцию пневматического шпинделя заложены больший срок службы и большая степень безопасности работы. Одним из основных преимуществ перед электрошпинделем является его принудительное воздушное охлаждение. В процессе работы электрический шпиндель сильно нагревается, что приводит к деформациям и ухудшению точности, что при микрообработке является существенным недостатком.

Для проведения экспериментов по микрошлифованию заготовок из легированных сталей используем вертикально-фрезерный станок EMCOMILL 300. Станок EMCOMILL 300 обеспечивает точность позиционирования 0,004 мм. Для обеспечения необходимой частоты вращения режущего инструмента применим высокоскоростной пневматический шпиндель, который будет установлен на штатный шпиндель станка EMCOMILL 300. Учитывая все требуемые технические характеристики и условия работы для проведения экспериментов, выбираем ультрапрецизионный высокоскоростной пневматический шпиндель HTS1501S фирмы Air Turbine Spindle. Данный шпиндель обеспечивает частоту вращения 150 000 об/мин, мощность 25 Вт, диаметр хвостовика режущего инструмента менее 4 мм.

В рамках данной работы для экспериментального исследования возьмем материал детали – сталь 40ХН2МА, хромо-никель-молибденовая конструкционная легированная сталь. Данную сталь применяют для изготовления ответственных и тяжелонагруженных деталей.

Обрабатываемость резанием: в горячекатанном состоянии при $HВ\ 228\text{--}235$ и $\sigma_b = 560$ МПа, $K_{\text{ув.спл}} = 0,7$ и $K_{\text{уб.ст}} = 0,4$. В состоянии поставки данная сталь обладает значительной вязкостью, что негативно сказывается на процессе шлифования. Однако, в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к деталям по чертежу, после термической обработки твердость должна составлять $HRC\ 35\text{--}39$, что положительно сказывается на применении процесса шлифования.

Исходя из рекомендаций, приведенных выше, выберем режущий инструмент из CBN. Данный инструмент должен обеспечить высокую производительность, высокую стойкость (примерно в 4 раза выше, чем инструмент из оксида алюминия и карбидов кремния), высокую теплопроводность.

В настоящее время на рынке присутствует много производителей режущего инструмента для микрошлифования. Исходя из ограничений эксперимента применим режущий инструмент сферической формы, а именно микрошлифовальный инструмент фирмы Nakanishi диаметром 1,2 мм.

Инструмент фирмы Nakanishi предназначен для обработки различных сталей, а хорошая балансировка инструмента позволяет вести обработку при частоте вращения шпинделя $n = 150\ 000$ об/мин. Режущая часть инструмента изготовлена из CBN, что удовлетворяет условиям эксперимента.

Режимы резания для эксперимента назначались исходя из рекомендаций производителя режущего инструмента и возможностей выбранного оборудования. Значения режимов резания составили: $n = 150\ 000$ об/мин; $S_{\text{мин}} = 150$ мм/мин; $V = 565,2$ м/мин; $t = 0,01$ мм.

2. Экспериментальные исследования. В рамках данного исследования проводились натурные испытания по микрошлифованию внутреннего диаметра отверстия. Для этого на станке EMCOMILL 300 проводилась серия экспериментов по микрошлифованию экспериментальных образцов микрошлифовальным инструментом.

В ходе проведения первого эксперимента обрабатывались образцы заготовки из стали 40ХН2МА в состоянии поставки, то есть с незакаленными поверхностями. Это обосновано тем, что обработка заготовок с помощью микрошлифования с частотами вращения инструмента до 150 000 об/мин мало изучена, и, возможно, резание незакаленного материала будет более эффективно.

Для проведения эксперимента заготовка устанавливалась в трехкулачковый патрон, закрепленный на столе фрезерного станка (рис. 1). Далее в шпиндель устанавливается инструмент для микрошлифования. Обработка заготовки – экспериментального образца – осуществлялась по винтовой траектории с режимами резания: $n = 150\ 000$ об/мин; $S_{\text{мин}} = 150$ мм/мин; $V = 565,2$ м/мин; $t = 0,01$ мм.



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда

В ходе проведения эксперимента выяснилось, что инструмент для микрошлифования очень интенсивно засаливается и уже после первого витка винтовой траектории приходит в негодность.

На рис. 2 представлена заготовка после обработки инструментом для микрошлифования в поперечном разрезе. Из рисунка видно, что инструмент на первом витке формировал канавку, профиль которой уменьшается, что свидетельствует о существенном снижении его режущей способности.

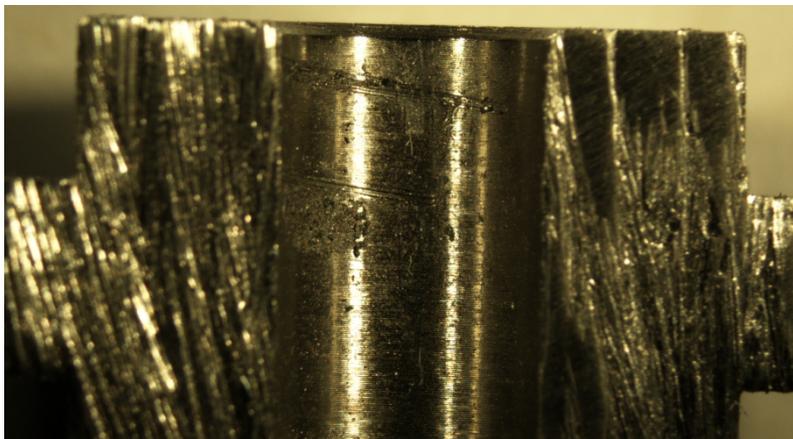


Рис. 2. Вид в разрезе на обработанную поверхность

Для проведения второго эксперимента заготовка закалялась при 850 °С в воде с последующим отпуском в масле до необходимых параметров по твердости. Последующая механическая обработка осуществлялась по той же схеме, что и первого эксперимента.

В ходе проведения эксперимента происходил значительный отжим режущего инструмента, что снизило эффективность процесса микрошлифования и показало его низкую производительность. Профиль винтовой канавки не удалось получить даже после 50 повторений рабочего цикла.

Выводы. Таким образом, проведенные исследования показали, что при микрошлифовании незакаленных образцов инструмент подвержен сильному засаливанию и интенсивному снижению режущей способности, то есть вязкие легированные стали обрабатывать микрошлифованием нельзя рекомендовать. Резание закаленных образцов показало, что при проектировании операции необходимо учитывать динамические характеристики технологической системы, и главным образом упругие отжатия от действия сил резания, поскольку инструмент, как самый нежесткий элемент технологической системы, сильно отжимается и обработать канавку методом микрошлифования не представляется возможным.

Предлагается рассматривать возможность предварительной обработки заготовок с помощью методов микрофрезерования и микроточения с последующим микрошлифованием, как отделочной операцией.

Литература

1. Къртунов, С. Състояние и тенденции в развитието на водещите технологии за изделия от микро- и нанотехниката / С. Къртунов. – ЮНС «35 г. катедра МУ». – Габрово, – 2003. – 23 с.
2. Богачев, Ю.П. Основы для микропроизводства / Ю.П. Богачев, О.П. Сахарова. – <https://ritm-magazine.ru/en/node/1586> (дата обращения: 10.05.2021).
3. Къртунов, С. Микросистемна техника / С. Къртунов, В. Тодорова. – Габрово: УИ «В. Априлов», 2002.
4. Park, H.W. *Micro Grinding Mechanics and Machine Tools: Research on the Methodologies to Predict Micro-Grinding and Design Meso-Machine Tools* / H.W. Park. – VDM Verlag, 2009. – 188 p.
5. Chang, W. *Development of Hybrid Micro Machining Approaches and Test-bed: PhD thesis* / W. Chang. – Heriot-Watt University, 2012. – 143 p.
6. Григорьев, С.Н. Инструментальное обеспечение микрообработки / С.Н. Григорьев, А.А. Борисов, А.Р. Маслов // *Станкоинструмент*. – 2015. – №12. – С. 32–37.
7. Pratapa, A. *Manufacturing Miniature Products by Micro-grinding: a Review* / A. Pratapa, K. Patraa, A.A. Dyakonov // *Procedia Engineering*. – 2016. – No. 150. – P. 969–974.

8. Дьяконов, А.А. Экспериментальное исследование температуры в зоне резания при микрошлифовании / А.А. Дьяконов, А.Е. Городкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, №2. – С. 50–56. DOI: 10.14529/engin170206.
9. Ultra-precision micro-grinding of germanium immersion grating element for mid-infrared super dispersion spectrograph / H. Ohmori, N. Ebizuka, S. Morita, Y. Yamagata // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2001. – No. 50. – P. 221–224.
10. Lee, P.H. Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air / P.H. Lee, S.W. Lee // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – No. 51. – P. 201–209.
11. Lee, P.H. An experimental study on micro-grinding process with nano-fluid minimum quantity lubrication (MQL) / P.H. Lee, J.S. Nam, C. Li, S.W. Lee // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2012. – No. 13. – P. 331–338.
12. Gao, S. Recent advances in micro- and nano-machining technologies / S. Gao, H. Huang // Mech. Eng. – 2017. – No. 12. – P. 18–32. DOI 10.1007/s11465-017-0410-9.
13. Mahabunphachai, S. Investigation of size effects on material behaviour of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales / S. Mahabunphachai, M. Koc // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2008. – No. 48. – P. 1014–1029.
14. Hwang, T.W. Size effect for specific energy in grinding of silicon nitride / T.W. Hwang, C.J. Evans, S. Malkin // Wear. – 1999. – No. 225–229. – P. 862–867.
15. Heinzl, C. The use of the size effect in grinding for work-hardening / C. Heinzl, N. Bleil // Annals of the CIRP. – 2007. – No. 56. – P. 327–330.
16. Anand, R.S. Modeling and Simulation of Mechanical Micro-Machining – A Review / R.S. Anand, K. Patra // Machining Science and Technology. – 2014. – No. 18. – P. 323–347.
17. Jin, X. Slip-line field model of micro-cutting process with round tool edge effect / X. Jin, Y. Altintas // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – No. 211. – P. 339–355.
18. The effect of tool edge radius on the contact phenomenon of tool-based micromachining / K.S. Woon, M. Rahman, K.S. Neo, K. Liu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – No. 48. – P. 1395–1407.
19. Pratap, T. Modeling cutting force in micro-milling of Ti-6Al-4V titanium alloy / T. Pratap, K. Patra, A.A. Dyakonov // Procedia Engineering. – 2015. – No. 129. – P. 134–139.
20. Jackson, M.J. Micro and nanomanufacturing / M.J. Jackson. – Springer-Verlag US. 2007. – 702 p.

Батуев Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, batuevva@susu.ru.

Батуев Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, batuevvv@susu.ru.

Поступила в редакцию 18 июня 2021 г.

TECHNOLOGICAL RESTRICTIONS OF THE APPLICATION OF MICRO-GRINDING SEMIMANUFACTURES FROM ALLOY STEELS

V.A. Batuev, batuevva@susu.ru,

V.V. Batuev, batuevvv@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In world practice, progressive technologies for processing micro-parts are increasingly being used. These technologies include micro-grinding. Micro-grinding allows you to process small parts with high productivity and surface cleanliness. Micro-grinding has the advantage over other micro-component manufacturing processes because it provides very high surface roughness and minimal burrs. Analysis of literature sources showed that most of the works are aimed at studying the processing of materials such as glass, silicon, AD33, AD35 due to their wide field of application. All work related to the processing of alloy steels is of an empirical nature and consisted in the selection of optimal cutting conditions. Thus, there are no universal technologies for the micro-grinding process aimed at processing parts, and the technology for processing a specific part from a specific material must be developed based on the basic concepts of “mechanical engineering technology” and improved by analyzing empirical data.

Within the framework of this work, experimental studies were carried out of the possibility of processing a part made of 40KhN2MA steel by the method of micro-grinding. For the study, an experimental stand was assembled on the basis of an ECOMILL 300 vertical milling machine equipped with a HTS1501S high-speed pneumatic spindle. A Nakanishi drill with a diameter of 1.2 mm was selected as the cutting tool. At the stand, workpieces with and without heat treatment were sequentially processed.

As a result of the study, the technological feasibility and efficiency of machining a part made of 40XH2MA steel by micro-grinding on a vertical CNC milling machine using a high-speed pneumatic spindle and a tool made of cubic boron nitride (CBN).

Keywords: micro-grinding, micro-machining, high-speed machining.

References

1. Kortunov S. *Sostoyanie i tendencii v razvitiio na vodeshchite tekhnologii za izdeliya ot mikro- i nanotekhnika* [State of the art and trends in the development of technologies for products from micro- and nanotechnology]. YUNS “35 g. katedra MU”. Gabrovo, 2003. 23 p.
2. Bogachev Yu.P., Saharova O.P. *Osnovy dlya mikroproizvodstva* [Basics for micro-manufacturing]. Available at: <https://ritm-magazine.ru/en/node/1586> (accessed 10.05.2021).
3. Kortunov S., Todorova V. *Mikrosistemna tekhnika* [Microsystem technology]. Gabrovo, UI “V. Aprilov”, 2002.
4. Park H.W. *Micro Grinding Mechanics and Machine Tools: Research on the Methodologies to Predict Micro-Grinding and Design Meso-Machine Tools*. VDM Verlag, 2009. 188 p.
5. Chang W. *Development of Hybrid Micro Machining Approaches and Test-bed*. PhD thesis. *Heriot-Watt University*, 2012. 143 p.
6. Grigor'e S.N., Borisov A.A., Maslov A.R. *Instrumental'noe obespechenie mikroobrabotki* [Instrumental support of micromachining]. *Stankoinstrument*, 2015, no. 12, pp. 32–37.
7. Pratapa A., Patraa K., Dyakonov A.A. *Manufacturing Miniature Products by Micro-grinding: a Review*. *Procedia Engineering*, 2016, no. 150, pp. 969–974.
8. D'yakonov A.A., Gorodkova A.E. *Eksperimental'noe issledovanie temperatury v zone rezaniya pri mikroshlifovanii* [Experimental study of the temperature in the cutting zone during microgrinding]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, T. 17, no. 2, pp. 50–56. DOI: 10.14529/engin170206
9. Ohmori H., Ebizuka N., Morita S., Yamagata Y. *Ultra-precision micro-grinding of germanium immersion grating element for mid-infrared super dispersion spectrograph*. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2001, no. 50, pp. 221–224.

10. Lee P.H., Lee S.W. Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, no. 51. pp. 201–209.
11. Lee P.H., Nam J.S., Li C., Lee S.W. An experimental study on micro-grinding process with nano-fluid minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, no. 13, pp. 331–338.
12. Gao S., Huang H. Recent advances in micro- and nano-machining technologies. *Mech. Eng.* – 2017, no. 12, pp. 18–32. DOI 10.1007/s11465-017-0410-9.
13. Mahabunphachai S., Koc M. Investigation of size effects on material behaviour of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, no. 48, pp. 1014–1029.
14. Hwang T.W., Evans C.J., Malkin S. Size effect for specific energy in grinding of silicon nitride. *Wear*, 1999, no. 225–229, pp. 862–867.
15. Heinzl C., Bleil N. The use of the size effect in grinding for work-hardening. *Annals of the CIRP*, 2007, no. 56, pp. 327–330.
16. Anand R.S. Patra K. Modeling and Simulation of Mechanical Micro-Machining—A Review. *Machining Science and Technology*, 2014, no. 18, pp. 323–347.
17. Jin X., Y. Altintas Slip-line field model of micro-cutting process with round tool edge effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, no. 211. pp. 339–355.
18. Woon K.S., Rahman M., Neo K.S., Liu K. The effect of tool edge radius on the contact phenomenon of tool-based micromachining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, no. 48, pp. 1395–1407.
19. Pratap T., Patra K., Dyakonov A.A. Modeling cutting force in micro-milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Procedia Engineering*, 2015, no. 129. pp. 134–139.
20. Jackson M.J. Micro and nanomanufacturing. *Springer-Verlag US*, 2007. 702 p.

Received 18 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Батуев, В.А. Технологические ограничения применения микрошлифования заготовок из легированных сталей / В.А. Батуев, В.В. Батуев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 15–22. DOI: 10.14529/engin210202

FOR CITATION

Batuev V.A., Batuev V.V. Technological Restrictions of the Application of Micro-grinding Semimanufactures from Alloy Steels. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 15–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin210202
