

УДК 621.787

ВЫГЛАЖИВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ, ПОСРЕДСТВОМ ОПРАВКИ ПРУЖИННОГО ТИПА, ОСНАЩЕННОЙ СТАЛЬНЫМ ШАРИКОМ

© 2025 А.Н. Швецов, А.И. Хаймович, Д.Л. Скуратов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 25.09.2025

На основе обзора научной и научно-технической литературы показана перспективность применения технологических процессов алмазного выравнивания, а также выравнивания стальными и твердосплавными шариками и роликами на качество изготовления деталей, выполненных из отливок, штамповок и проката, т.е. из заготовок полученных традиционными методами. Сделано предположение о целесообразности использования данных методов отделочно-упрочняющей обработки при изготовлении деталей из заготовок, полученных с применением аддитивных технологий. Представлена разработанная и изготовленная оправка пружинного типа, оснащенная шариком из подшипниковой стали ШХ15 и предназначенная для выравнивания плоских и криволинейных поверхностей на оборудовании с ЧПУ. Приведены результаты исследования шероховатости криволинейной поверхности образца из жаропрочного сплава на никелевой основе марки ВЖ159, полученного методом селективного лазерного сплавления, до и после выравнивания ее оправкой со стальным шариком, упомянутой ранее, на фрезерном станке 6М13ГН-1 с ЧПУ FMS-3000.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, образец из сплава ВЖ-159, криволинейная поверхность, выравнивание шариком, оправка пружинного типа, фрезерный станок с ЧПУ, шероховатость поверхности.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-116-122

EDN: NPGZWZ

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки
и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSS-2024-0018).*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ технологических процессов изготовления ответственных высоконагруженных деталей изделий машиностроения, авиационной техники, автомобилей и т.д. показывает, что поверхностное пластическое деформирование (ППД) является неотъемлемой составляющей многих из них [1-6]. При этом значительное место среди методов ППД принадлежит выравниванию деталей наконечниками из натуральных и синтетических алмазов, стальными шариками и роликами, закаленными до высокой твердости, и твердосплавными элементами, входящими в комплект различных оправок. Указанные методы отделочно-упрочняющей обработки обладают высокой эффективностью и не требуют наличия в производстве какого-либо специального оборудования. Высокая эффективность процессов выравнивания достигается, с одной стороны, за счет обеспечения высокой производительности и стойкости выравнивающего инструмента [2], с другой стороны, за счет существенного улучшения качества поверхностного слоя [1, 2, 4-6], а именно: уменьшения шероховатости деталей, увеличения наклепа поверхностного слоя и формирования в нем сжимающих остаточных напряжений. При этом требуемые параметры качества поверхностного слоя, как следует, например, из работы [5], могут быть обеспечены за счет выбора рациональных условий обработки. Важным достоинством процессов выравнивания является устранение или частичное «залечивание» микротрещин, пор и других дефектов, имеющихся на обрабатываемой поверхности детали, за счет упрочнения поверхностного слоя до оптимального значения и формирования в нем значительных сжимающих остаточных напряжений. А улучшение качества поверхностного слоя благоприятно сказывается на повышении сопротивления усталости деталей [1, 3]. Процессы выравнивания наиболее широкое распространение получили при обработке наружных и внутренних цилиндрических поверхностей.

Швецов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: shvecovalexey@yandex.ru

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологий производства двигателей. E-mail: berill_samara@bk.ru

Скуратов Дмитрий Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры техно-логий производства двигателей. E-mail: skuratov.sdl56@yandex.ru

Реже эти методы используются при отделочно-упрочняющей обработке плоских, криволинейных или сложнофасонных поверхностей. В свою очередь обработка криволинейных и сложнофасонных поверхностей требует наличия специальных оправок, в которых выглаживающий элемент, например, шарик может двигаться по любой траектории, сохраняя возможность вращения.

В настоящее время для изготовления деталей, например, изделий авиационной и медицинской промышленности и т.д., имеющих сложную форму, все чаще используют заготовки, выращенные с использованием аддитивных технологий из металлических порошков. Эти аддитивные технологии часто называют 3D-печатью. На сегодняшний день заготовки, изготовленные с помощью 3D-печати, производятся методами прямого лазерного сплавления металла (DED), селективного лазерного сплавления (SLM) и электронного лучевого сплавления (EBM). Геометрические размеры таких заготовок максимально приближены к конечному изделию благодаря послойному выращиванию из соответствующих металлических порошков. Тем не менее в большинстве случаев поверхности таких заготовок подвергаются последующей обработке. Обычно пост обработка выполняется механическими способами, включая ручную и автоматизированную шлифовку, пескоструйную обработку, полировку и выглаживание [7-9], или химическими методами, например электролитической полировкой [10]. Одним из эффективных методов снижения шероховатости аддитивно изготовленных деталей является выглаживание [9].

В большинстве случаев погрешности формы и размеров выращенных заготовок укладываются в установленные допуски, однако поверхность таких деталей характеризуется специфическим микрорельефом, возникающим при послойном наращивании материала из-за высокой вариативности процессов, вызванной изменчивостью условий сплавления и теплообмена. В результате искажений геометрии при выращивании возникает риск неравномерного съема припуска при последующей механической лезвийной обработке, а в некоторых случаях – образование минимальных припусков, при которых процесс резания становится невозможным. Это приводит к образованию радиальных надиров, росту микронеровностей и формированию нежелательных растягивающих остаточных напряжений, т.е. к ухудшению качества поверхности. В результате для гарантированного обеспечения стабильной величины шероховатости поверхности при выполнении последующей механической обработки на выращенную заготовку необходимо закладывать заведомо большие припуска. Обычно шероховатость поверхностей заготовок, выращенных аддитивными методами, не опускается ниже $Ra\ 5...6\ \mu m$, что обусловлено особенностями процесса формирования микрорельефа в области аддитивного выращивания. По данным же авторов работы [11], средние значения шероховатости поверхностей изделий, полученных методом аддитивных технологий с использованием различных порошковых материалов, колеблются в пределах $Ra\ 6...12\ \mu m$. Высокая шероховатость поверхности достаточно часто связана с использованием нерациональных условий выращивания и с эффектом комкования [12]. Кроме того, послойное наращивание материала нередко сопровождается образованием пор [13, 14].

В научно-технической литературе, в частности работе [15], встречаются решения, где шариковый выглаживатель применяется для выглаживания сложных поверхностей на фрезерном оборудовании. Вместе с тем данные об использовании выглаживания для заготовок сложной формы, изготовленных аддитивными технологиями, отсутствуют. Поэтому в качестве альтернативы традиционной механической обработке в данной статье поставлена цель исследовать возможность 3D выглаживания криволинейной поверхности образца, выращенного методом SLM, специальной оправкой пружинного типа оснащенной стальным шариком. Учитывая ранее изложенные достоинства процессов выглаживания, можно предположить, что выглаживание поверхностей шариком будет более эффективным способом улучшения итоговой поверхности с точки зрения снижения шероховатости и устранения ее дефектов (налипов, поверхностных пор и т.д.), возникающих при послойном выращивании, по сравнению с другими видами механической обработки. При этом форма детали до и после обработки останется с теми же отклонениями что были получены при выращивании аддитивными методами.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выглаживания криволинейных поверхностей заготовок, полученных методом аддитивных технологий, была спроектирована (рис. 1) и изготовлена (рис. 2) оправка с пружинным типом нагружения рабочего элемента, в качестве которого применяется шарик диаметром 5 мм из закаленной подшипниковой стали ШХ15. Представленная оправка предназначена для использования на программных фрезерных станках и обрабатывающих центрах. Конструкция оправки позволяет рабочему элементу (2) свободно обкатываться по обрабатываемой поверхности в любом из направлений практически без скольжения за счёт использования трех шарикоподшипников (4), расположенных под углом 120° друг относительно друга. Шарик большого диаметра (3) служит для отдаления рабо-

чего шарика (2) от шарикоподшипников (4), получения возможности выполнения на корпусе выглаживающего наконечника (1) конуса, что необходимо при обработке внутренних и вогнутых поверхностей, а также для уменьшения передаточного отношения между контактируемыми шариками (2) и (3). Наличие в корпусе оправки (9) двух пазов с возможностью перемещения по ним стержней (13), установленных в упорной гайке (12) и ползуне (10), исключает проворачивание двух последних и ограничивает их свободный ход. В статическом положении регулировка прижимного усилия может осуществляться путем вращения регулировочного винта (14), а в процессе непосредственной работы путем перемещения ползуна (10) относительно корпуса (9). Сила выглаживания кратная 50 Н обеспечивается при перемещении ползуна (10) или упорной гайки (12) на расстояние равное 3,2 мм.

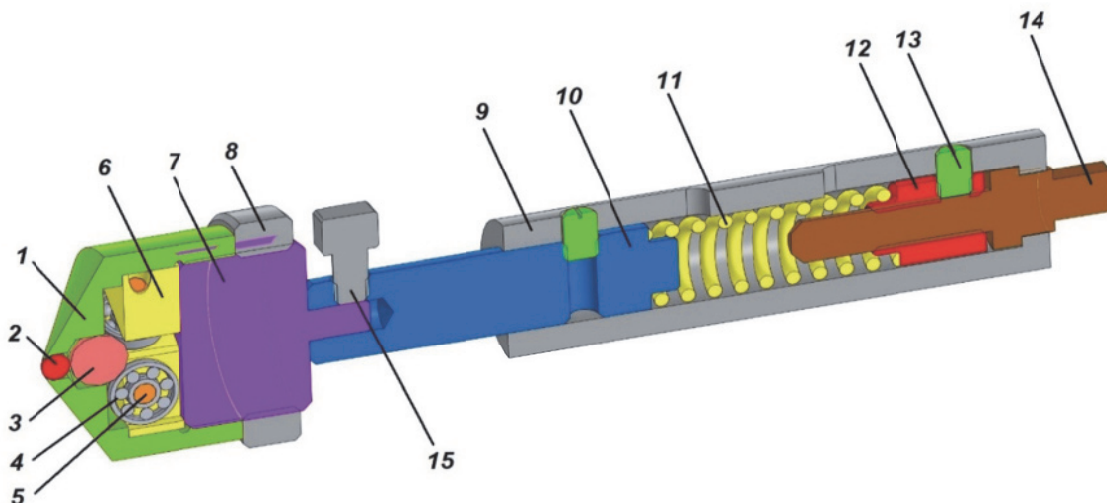


Рис. 1. Компоновка оправки для выглаживания:

- 1 – корпус выглаживающего наконечника; 2 – шарик малого диаметра; 3 – шарик большого диаметра;
4 – шарикоподшипник; 5 – ось подшипника; 6 – сепаратор подшипников;
7 – резьбовая крышка с цилиндрическим хвостовиком; 8 – контргайка; 9 – корпус оправки; 10 – ползун; 11 – пружина сжатия; 12 – упорная гайка; 13 – резьбой стержень;
14 – регулировочный винт; 15 – винт крепления выглаживающего наконечника



Рис. 2 – Общий вид оправки для выглаживания

Исследование процесса выглаживания осуществлялось на образце из жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, выращенного методом селективного лазерного сплавления и имеющего радиус кривизны обрабатываемой поверхности равный 600 мм. Общий вид образца показан на рис. 3. Выглаживание производилось на программном фрезерном станке 6М13ГН1 с системой ЧПУ FMS-3000. Непосредственно процесс выглаживания представлен на рис. 4, а, а схема движения инструмента на рис. 4, б. Управляющая программа была написана в G-кодах.

Скорость выглаживания составляла $v = 120$ мм/мин, а величина подачи между проходами – $S = 0,1$ мм/ход.

После процесса выглаживания на исследуемом образце оценивалась шероховатость поверхности в направлении вектора движения инструмента, т.е. оправки с шариком, и в перпендикулярном ему направлении, т.е. в направлении движения подачи. Измерение шероховатости поверхности осуществлялось посредством автоматизированного профилографа-профилометра модели БВ-7669.

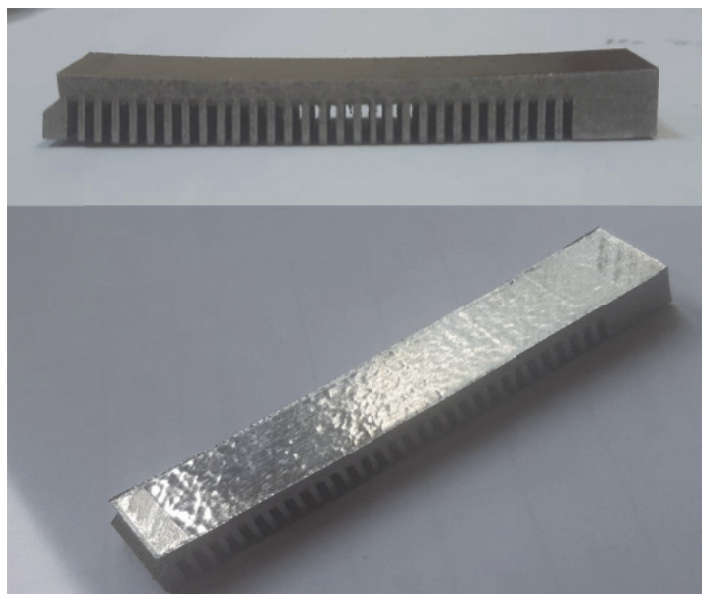


Рис. 3. Криволинейный образец после выглаживания

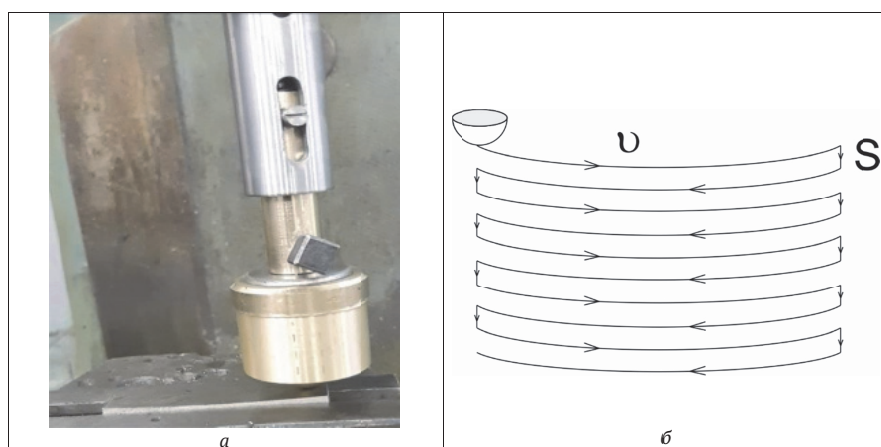


Рис. 4. Процесс выглаживания (а) и схема движения инструмента (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ

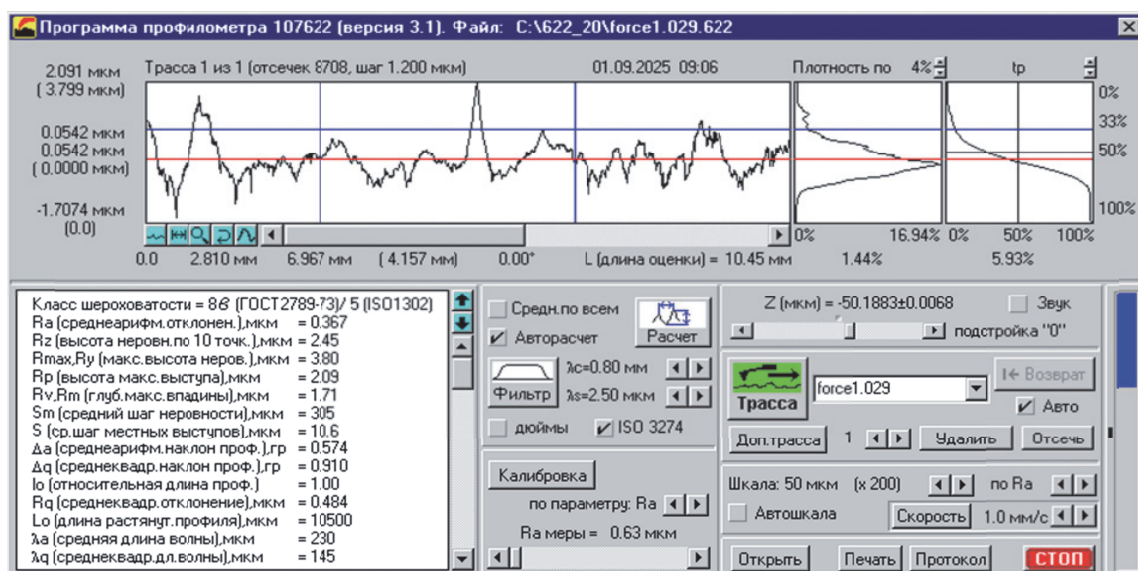
Перед проведением выглаживания образца с криволинейной поверхностью была определена ее исходная шероховатость. Исследование показало, что шероховатость поверхности образца до выглаживания составила по параметру Ra в поперечном направлении $2,11 \text{ мкм}$ и в продольном направлении $1,09 \text{ мкм}$. Как видно, это существенно меньше значений указанных ранее. Уменьшение шероховатости поверхности исходного образца обусловлено тем, что на заключительном этапе его выраживания было выполнено оплавление криволинейной поверхности, т.е. проход по ней лазерным лучом без подачи металлического порошка. Из чего следует, что выполнение такого перехода при осуществлении выраживания способствует снижению величины шероховатости поверхности и сопоставимо с процессом выглаживания при шлифовании.

Результаты выглаженной поверхности образца в продольном и поперечном направлениях после процесса обработки шариком представлены на рис. 5 и в таблице 1.

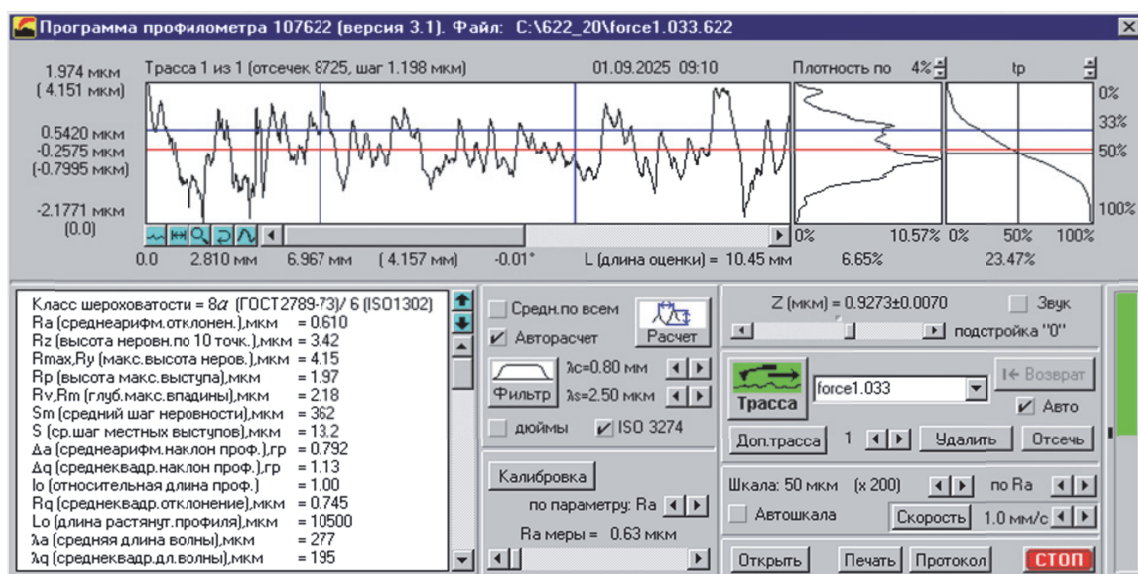
Как видно из таблицы 1, процесс выглаживания поверхности шариком приводит к существенному снижению всех высотных параметров микронеровностей Ra , Rz и $Rmax$ как в продольном, так и поперечном направлениях. В продольном направлении высотные параметры снижаются примерно в $2,1...3$ раза, а поперечном в $3,5...8,3$ раза. При этом средний шаг неровностей профиля увеличивается в продольном и поперечном направлениях соответственно в $1,7$ и $1,35$ раза, а средний шаг местных выступов профиля уменьшается в указанных направлениях в $4,5$ и $1,85$ раза. А это должно привести к повышению износостойкости деталей. Относительная опорная длина профиля при уровне сечения профиля 33% в поперечном направлении увеличивается в $3,55$ раза, а в продольном – снижается в $3,4$ раза. Поэтому, исходя из полученных результатов, можно сделать заключение о существенном улучшении шероховатости поверхности выглаженной криволинейной поверхности.

Таблица 1. Результаты исследования шероховатости исходной и выглаженной поверхностей

Параметры шероховатости поверхности	Исходная поверхность		Выглаженная поверхность	
	в продольном направлении	в поперечном направлении	в продольном направлении	в поперечном направлении
Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм	1,09	2,11	0,367	0,610
Высота неровностей по десяти точкам Rz , мкм	7,34	17,1	2,45	3,42
Наибольшая высота неровностей $Rmax$, мкм	8,11	34,6	3,8	4,15
Средний шаг неровностей профиля Sm , мкм	181	265	305	362
Средний шаг местных выступов профиля S , мкм	47,9	24,5	10,6	13,2
Относительная опорная длина профиля tp (при $p = 33\%$), %	20,03	6,62	5,93	23,47



а



б

Рис. 5. Профилограммы выглаженной поверхности образца в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

ВЫВОДЫ

1. Аддитивные технологии обеспечивают возможность производства заготовок с высокой сложностью геометрии и приближенностью к окончательной форме. Однако поверхность таких изделий характеризуется микрорельефом, формируемым в процессе послойного наращивания, что придает поверхности шероховатость не менее 5...6 мкм по параметру Ra . В связи с этим для последующей механической обработки в большинстве случаев необходимо предусматривать запас припуска и закладывать дополнительные затраты на обработку.

2. Оплавление поверхности заготовок лазерным лучом без подачи металлического порошка способствует уменьшению шероховатости поверхности до значений Ra 1,1...2,1 мкм.

3. В качестве альтернативы механической лезвийной обработке предложена технология отделочно упрочняющей обработки методом выглаживания сферическим вращающимся инструментом, позволяющая при обработке криволинейных сложнопрофильных поверхностей существенно снизить шероховатость поверхности.

4. Проведённые лабораторные испытания технологии выглаживания подтвердили её эффективность. При выглаживании специальным инструментом криволинейной поверхности на фрезерном станке с ЧПУ достигнуто снижение параметра Ra на 0,7...1,5 мкм, Rz на 4,9...13,7 мкм и $Rmax$ 4,3...30,5 мкм за один проход. Опробованная технология предназначена для обеспечения стабильного качества сложно профильных поверхностей деталей, выращенных по технологии SLM, без необходимости закладывания припусков под лезвийную механическую обработку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
2. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
3. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
4. Бобровский, Н.М. Устройство для гиперпроизводительной финишной обработки поверхностей деталей выглаживанием / Н.М. Бобровский, А.В. Ежелев, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 6. – С. 93-96.
5. Швецов, А.Н. Влияние параметров процесса алмазного выглаживания на качество поверхностного слоя при производстве изделий авиационной техники / А.Н. Швецов, Д.Л. Скуратов // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30. – № 4. – С. 220-231.
6. Комков, В.А. Исследование возможностей упрочнения поверхностей тонкостенных элементов летательных аппаратов методом поверхностной пластической деформации / В.А. Комков, О.Г. Кокорева, А.В. Курсаков // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Т. 22. – № 2. – С. 132-136.
7. Hashmi, A. W. Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review / A. W. Hashmi, H. S. Mali, A. Meena // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 81. – P 723-738.
8. Fashanu, F. Review of Surface Finishing of Additively Manufactured Metal Implants / F. Fashanu, D. Marcellin-Little, B. Linke // Manufacturing Science and Engineering Conference. – 2020. – P. 8419.
9. Kebede, F. T. Characterization of Surface Integrity of 3D-Printed Stainless Steel by Successive Grinding and Varied Burnishing Parameters / F. T. Kebede, J. Zaghal, C. Felho // Machines. – 2024. – Vol. 12. – № 11. – P. 790.
10. Pravin, K. Surface finishing of an additively manufactured part using electrochemical jet machining / K. Pravin, D. Pradeep, C. Bhavesh, N.K. Jain // Materials Today Communications. – 2023. – Vol 35. – P. 105581.
11. Сухов, Д.И. Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства / Д.И. Сухов, С.В. Неруш, С.В. Беляков, П.Б. Мазалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 9(690). – С. 73-84.
12. Алексеев, В.П. Совершенствование инструментов повышения качества продукции в процессах производства деталей методом селективного лазерного сплавления: дис... канд. техн. наук: 2.5.22 / Алексеев Вячеслав Петрович. – Самара, 2024. – 132 с.
13. King, W.E. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing / W.E. King, H.D. Barth, V.M. Castillo, G.F. Gallegos, J.W. Gibbs, D.E. Rubenchik, A. M. // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – №12. – P. 2915-2925.
14. Mukherjee, T. Printability of alloys for additive manufacturing / T. Mukherjee, J.S. Zuback, A. De, T. DebRoy // Sci Rep. – 2016. – Vol. 6. – P. 19717.
15. Shiou, Fang-Jung. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process / Fang-Jung Shiou, Chien-Hua Chen // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140. – P. 248-254.

BURNISHING OF THE CURVED SURFACE OF THE WORKPIECE OBTAINED BY SELECTIVE LASER FUSION BY MEANS OF A SPRING-TYPE MANDREL EQUIPPED WITH A STEEL BALL

© 2025 A.N. Shvetcov, A.I. Khaymovich, D.L. Skuratov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,
Samara, Russia

Based on a review of scientific and technical literature, the prospects of using technological processes of diamond smoothing, as well as smoothing with steel and carbide balls and rollers for the quality of manufacturing parts made from castings, stampings and rolled products, i.e. from blanks obtained by traditional methods, are shown. An assumption is made about the expediency of using these methods of finishing and hardening processing in the manufacture of parts from blanks obtained using additive technologies. A developed and manufactured spring-type mandrel is presented, equipped with a ball made of SHX15 bearing steel and designed for smoothing flat and curved surfaces on CNC equipment. The results of a study of the roughness of the curved surface of a sample made of a heat-resistant nickel-based alloy of the VJ159 grade obtained by selective laser fusion are presented before and after smoothing it with a mandrel with a steel ball, mentioned earlier, on a 6M13GN-1 CNC milling machine FMS-3000.

Keywords: Selective Laser Melting, sample of VZH-159 alloy, curved surface, ball burnishing, spring type mandrel, CNC milling machine, surface roughness.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-116-122

EDN: NPGZWZ

*The work was carried out as part of the state assignment of the Ministry of Science
and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FSSS-2024-0018).*

REFERENCES

1. *Torbilo, V.M.* Almaznoe vyglazhivanie / V.M. Torbilo. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 105 s.
2. *Odincov, L.G.* Uprochneniye i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik / L.G. Odincov. – M.: Mashinostroyeniye, 1987. – 328 s.
3. *Sulima, A.M.* Poverhnostnyy sloj i ekspluatatsionnye svoystva detalej mashin / A.M. Sulima, V.A. Shulov, Yu.D. Yagodkin. – M.: Mashinostroyeniye, 1988. – 240 s.
4. *Bobrovskiy, N.M.* Ustroystvo dlya giperproizvoditel'noy finishnoy obrabotki poverh-nostey detalej vyglazhivaniem / N.M. Bobrovskiy, A.V. Ezhelev, P.A. Mel'nikov, I.N. Bobrovskiy // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoy akademii nauk. – 2012. – T. 14. – № 6. – S. 93-96.
5. *Shvecov, A.N.* Vliyaniye parametrov processa almaznogo vyglazhivaniya na kachestvo poverhnostnogo sloya pri proizvodstve izdelij aviacionnoy tekhniki / A.N. Shvecov, D.L. Skuratov // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. – 2023. – T. 30. – № 4. – S. 220-231.
6. *Komkov, V.A.* Issledovaniye vozmozhnostey uprochneniya poverhnostey tonkostennykh ele-mentov letatel'nykh apparatov metodom poverhnostnoy plasticheskoy deformatsii / V.A. Komkov, O.G. Kokoreva, A.V. Kursakov // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. – 2015. – T. 22. – № 2. – S. 132-136.
7. *Hashmi, A.W.* Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review / A. W. Hashmi, H. S. Mali, A. Meena // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Vol. 81. – P. 723-738.
8. *Fashanu, F.* Review of Surface Finishing of Additively Manufactured Metal Implants / F. Fashanu, D. Marcellin-Little, B. Linke // Manufacturing Science and Engineering Conference. – 2020. – P. 8419.
9. *Kebede, F.T.* Characterization of Surface Integrity of 3D-Printed Stainless Steel by Successive Grinding and Varied Burnishing Parameters / F. T. Kebede, J. Zagal, C. Felho // Machines. – 2024. – Vol. 12. – № 11. – P. 790.
10. *Pravin, K.* Surface finishing of an additively manufactured part using electrochemical jet ma-chining / K. Pravin, D. Pradeep, C. Bhavesh, N.K. Jain // Materials Today Communications. – 2023. – Vol 35. – P. 105581.
11. *Suhov, D.I.* Issledovaniye parametrov sherohovatosti poverhnostnogo sloya i tochnosti izgotovleniya izdelij additivnogo proizvodstva / D.I. Suhov, S.V. Nerush, S.V. Belyakov, P.B. Mazalov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. – 2017. – № 9(690). – S. 73-84.
12. *Alekseev, V.P.* Sovershenstvovaniye instrumentov povysheniya kachestva produktsii v processah proizvodstva detalej metodom selektivnogo lazernogo splavleniya: dis... kand. tekhn. nauk: 2.5.22 / Alekseev Vyacheslav Petrovich. – Samara, 2024. – 132 s.
13. *King, W.E.* Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing / W.E. King, H.D. Barth, V.M. Castillo, G.F. Gallegos, J.W. Gibbs, D.E. Rubenchik, A. M. // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – №12. – P. 2915-2925.
14. *Mukherjee, T.* Printability of alloys for additive manufacturing / T. Mukherjee, J.S. Zuback, A. De, T. DebRoy // Sci Rep. – 2016. – Vol. 6. – P. 19717.
15. *Shiou, Fang-Jung.* Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process / Fang-Jung Shiou, Chien-Hua Chen // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140. – P. 248-254.

Aleksey Shvetcov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Engine Production Technology.

E-mail: shvecovalexey@yandex.ru

Alexander Khaymovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Engine Production Technology.

E-mail: berill_samara@bk.ru

Dmitry Skuratov, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Engine Production Technology. E-mail: skuratov.sdl56@yandex.ru