

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ159
ПОСРЕДСТВОМ ИХ ВЫГЛАЖИВАНИЯ ИНДЕНТОРАМИ,
ОСНАЩЕННЫМИ АЛМАЗАМИ СО СФЕРИЧЕСКОЙ
РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И СТАЛЬНЫМ ШАРИКОМ**

Швецов А.Н., Хаймович А.И., Скуратов Д.Л., Жидяев А.Н.
Самарский университет, г. Самара, shvecov.an@ssau.ru

Ключевые слова: выглаживание, параметры процесса выглаживания, индентор со сферическим алмазом, индентор в виде стального шарика, специальная оправка, образцы из жаропрочного сплава ВЖ159, шероховатость поверхности

Процессы поверхностного пластического деформирования (ППД) посредством их выглаживания в частности инденторами, оснащенными синтетическими алмазами со сферической рабочей поверхностью и стальными шариками, находят все более широкое применение при обработке цилиндрических, плоских и реже фасонных поверхностей в связи со сложностью их обработки. Обработка простых геометрических поверхностей достаточно легко и с минимальными затратами реализуется на универсальном оборудовании, а обработка поверхностей со сложным профилем все чаще выполняется на оборудовании с ЧПУ [1] в связи с интенсивным оснащением им промышленных предприятий.

ППД методом выглаживания, как хорошо известно [2], обеспечивает снижение шероховатости поверхности, повышение микротвердости поверхностного слоя и формирование в нем сжимающих остаточных напряжений, благоприятно влияющих на сопротивление усталости деталей.

Следует отметить, что в настоящее время все большее количество заготовок из труднообрабатываемых материалов со сложным фасонным профилем в единичном и мелкосерийном производствах изготавливаются методами аддитивных технологий. Однако данные методы имеют ряд недостатков, к которым следует отнести, во-первых, сравнительно высокую шероховатость поверхности, а, во-вторых, наличие пор в выращенном материале. Эти недостатки могут быть устранены методом выглаживания. Процесс выглаживания позволяет существенно снизить шероховатость поверхности и уменьшить пористость поверхностного слоя [3, 4].

Для изготовления ответственных деталей газотурбинных двигателей нередко используют жаропрочный деформируемый сплав ВЖ159 [5], поэтому определение наилучших условий выглаживания этого материала с целью обеспечения требуемой шероховатости поверхности представляет большой практический интерес. Исходя из ранее изложенного, был проведен комплекс натурных экспериментальных исследований, включающий обработку цилиндрических образцов из сплава ВЖ159 и фасонного образца в виде пера лопатки из этого же материала. Образцы были изготовлены методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из металлопорошковой композиции. Обработка цилиндрических образцов выполнялась на токарно-винторезном станке модели 1В616П инденторами, оснащенными синтетическими алмазами марки АСБ-1 со сферической рабочей частью, а обработка фасонных поверхностей индентором в виде вращающегося стального шарика радиусом $R_{ш} = 2,5$ мм, установленном в специальную оправку. Выглаживание фасонного образца осуществлялось на обрабатывающем центре S500L. В процессе выглаживания данного образца вектор силы практически всегда располагался нормально к обрабатываемой поверхности.

При выглаживании цилиндрических образцов варьировались сила выглаживания ($P_y = 50...350$ Н), радиус сферической части алмаза ($R_{сф} = 1...3$ мм), исходная шероховатость поверхности ($R_{аисх} = 1,04...4,75$ мкм), подача ($S_o = 0,02...0,13$ мм/об) и скорость

выглаживания ($v = 16 \dots 63$ м/мин). По результатам данного этапа исследований были получены обобщенные степенные зависимости, определяющие влияние указанных ранее параметров процесса алмазного выглаживания на шероховатость поверхности по параметру R_a . Данные зависимости имеют вид:

при радиусе инструмента от 1 до 2 мм

$$R_a = 121 \cdot P_y^{-0,715} R_{сф}^{-0,797} R_{a.исх}^{0,326} S_o^{0,52} v^{-0,23}; \quad (1)$$

при радиусе инструмента свыше 2 до 3 мм

$$R_a = 7,99 \cdot P_y^{-0,715} R_{сф}^{3,24} R_{a.исх}^{0,326} S_o^{0,52} v^{-0,23}, \quad (2)$$

Сопоставление результатов расчета, выполненного с использованием зависимостей (1) и (2), с данными натурального эксперимента показало, что погрешность не превышает 20%.

При выглаживании образца со сложным фасонным профилем в виде пера лопатки варьировалась только сила выглаживания в диапазоне $P_y = 100 \dots 250$ Н, а скорость выглаживания v и подача S_o оставались неизменными и равнялись соответственно 120 м/мин и 0,1 мм/об. На рисунке представлена траектория движения индентора в виде стального вращающегося шарика при обработке профильной части образца.

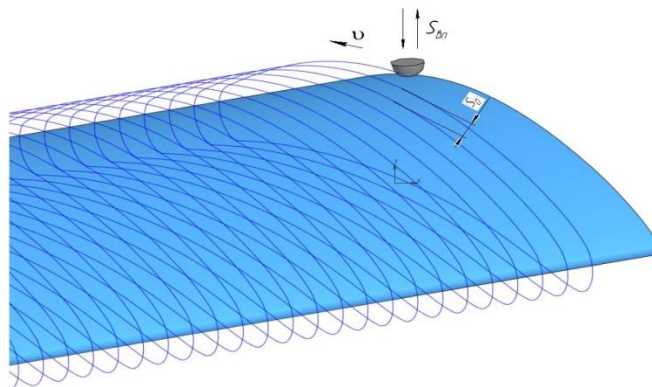


Рис. 1 – Траектория движения индентора

Результаты измерения шероховатости представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения параметров шероховатости поверхности у образца со сложным профилем

Параметры шероховатости	Исходная поверхность	Сила выглаживания P_y , Н			
		100	150	200	250
R_a , мкм	6,47	1,32	0,92	0,51	1,01
R_{max} , мкм	42,6	11,7	10,4	3,12	14,8
S_m , мкм	183	145	132	153	115
S , мкм	40,7	12,3	10,2	10,1	10
t_{50} , %	42,06	88,33	46,89	40,8	39,56

Исследованием установлено, что наименьшие значения высотных параметров шероховатости поверхности имеют место при силе выглаживания равной 200 Н. Меньшие значения силы недостаточны для полного сглаживания микронеровностей, а при больших значениях силы упрочняющий эффект процесса доминирует над сглаживающим.

Список литературы

1. Александров, И.М. Анализ возможности применения низкопластичного выглаживания для повышения надежности лопаток ГТД / И.М. Александров, К.Е. Миляев, С.В. Семенов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 53. – С. 86-96.
2. 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.
3. Швецов, А.Н. Выглаживание криволинейной поверхности заготовки, полученной методом селективного лазерного сплавления, посредством оправки пружинного типа, оснащенной стальным шариком / А.Н. Швецов, А.И. Хаймович, Д.Л. Скуратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 5. – С. 116-122.
4. Вишнепольский, Е.В. Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием / Е.В. Вишнепольский, Д.В. Павленко // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 62-69.
5. Мазалов, И.С. Перспективы применения жаропрочного структурно-стабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпературных деталей ГТД / И.С. Мазалов, А.Г. Евгенов, С.М. Прагер // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № S1 (43). – С. 3-7.

Сведения об авторах

Швецов Алексей Николаевич – к.т.н., доцент кафедры технологий производства двигателей, область научных интересов: процессы поверхностно-пластического деформирования материалов.

Хаймович Александр Исаакович – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологий производства двигателей, область научных интересов: автоматизация металлообработки, формообразующие процессы и технологии; аддитивные технологии LDED, LPBF; автоматизация управления качеством производственных процессов.

Скуратов Дмитрий Леонидович – д.т.н., профессор, профессор кафедры технологий производства двигателей, область научных интересов: структурно-параметрическая оптимизация процессов механической обработки материалов; методы поверхностно-пластического деформирования материалов.

Жидяев Алексей Николаевич – старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей, область научных интересов: процессы механической обработки материалов.

IMPROVING QUALITY OF THE SURFACE LAYER OF PARTS MADE OF THE HIGH-TENSILE ALLOY VZH159 BY USING INDENTORS WITH DIAMONDS WITH A SPHERICAL WORKING SURFACE AND STEEL BALL

Shvetsov A.N., Khaymovich A.I., Skuratov D.L., Jidyaev A.N.
Samara University, Samara city, shvecov.an@ssau.ru

Keywords: smoothing, smoothing process parameters, spherical diamond indenter, steel ball indenter, special mandrel, samples made of VZh159 heat-resistant alloy, surface roughness

The influence of the diamond smoothing process parameters on the surface roughness during the processing of cylindrical samples made by the selective laser melting method from the heat-resistant alloy VZh159 was investigated, and the power dependences relating these parameters to the arithmetic mean deviation of the profile were obtained. It was found that when smoothing a complex shaped surface of a sample in the form of a blade tip, obtained from a similar material by the same method, with an indenter in the form of a steel rotating ball, the optimal value of the smoothing force to ensure the minimum surface roughness is 200 N.