

УДК 921.9

Влияние шероховатости исходной поверхности на силу алмазного выглаживания

Антонюк Ф. И.¹, Калмыков В. В.^{1,*},

[*sorat-vad@yandex.ru](mailto:sorat-vad@yandex.ru)

Федоров В. А.¹

¹Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия

В статье изложены результаты исследования алмазного выглаживания наружных поверхностей деталей из неупрочненной малоуглеродистой стали. Из-за ее относительно высокой вязкости обтачивание исходной поверхности перед алмазным выглаживанием характеризуется значительно большей шероховатостью по сравнению с рекомендуемой в справочной литературе. Исследована возможность эффективного выглаживания деталей с высокой шероховатостью исходной поверхности. На основе регрессионного и дисперсионного анализов результатов многофакторных экспериментов определена зависимость оптимальной силы алмазного выглаживания от изменения в широком диапазоне высоты микронеровностей профиля исходной поверхности. Показано, что значительное, в 2 раза, увеличение высоты неровностей существенно уменьшает величину оптимальной силы выглаживания и снижает ее устойчивость к возможному превышению.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, алмазное выглаживание, шероховатость поверхности, высота микронеровностей профиля поверхности, эффективность выглаживания

Введение

Применение алмазного выглаживания – одного из способов поверхностного пластического деформирования (ППД) позволяет существенно изменить качество поверхностного слоя деталей: повысить его прочность на 25...60%; увеличить глубину упрочненного слоя до 0,15...0,4 мм; создать в нем остаточные сжимающие напряжения, достигающие 800...1100 МПа. Наряду с этим изменяются параметры микрогеометрии поверхности: в 4 и более раз уменьшается высота неровностей профиля (Ra , мкм), а также, вследствие изменения их формы, возрастает относительная опорная длина профиля (t_p , %).

В результате пластической деформации поверхностного слоя повышаются такие эксплуатационные свойства деталей как износостойкость, контактная жесткость, усталостная прочность и коррозионная стойкость [1].

Алмазное выглаживание, по сравнению с другими способами ППД, характеризуется более широким диапазоном твердости обрабатываемых сплавов. Его успешно применяют

не только для выглаживания стальных закаленных деталей, но и деталей из различных сплавов средней и низкой твердости.

1. Технологические параметры выглаживания

Основными технологическими параметрами алмазного выглаживания являются радиус сферы алмазного наконечника, сила выглаживания, подача, а также шероховатость исходной поверхности. Для выбора первых трех параметров в специальной литературе приведены достаточно четкие, непротиворечивые рекомендации, в отличие от рекомендаций по обеспечению шероховатости исходной поверхности [1,5]. Последнее замечание относится, в основном, к деталям из различных сплавов с твердостью $HB < 300$ МПа.

Обычно наибольшие предельные значения исходной шероховатости назначают по условию обеспечения максимальной эффективности выглаживания, которую оценивают соотношением шероховатости (Ra) до и после выглаживания. При этом учитывают твердость сплава таким образом, что с ее уменьшением шероховатость исходной поверхности увеличивают. В частности, в соответствии с указанными критериями, детали из относительно мягких, незакаленных сталей следует выглаживать при исходном параметре шероховатости $Ra \leq 2,0$ мкм [1]. Однако, такие рекомендации вступают в противоречие с требованиями по обрабатываемости резанием низкоуглеродистых сталей: вследствие их относительно высокой вязкости шероховатость обточенной поверхности должна быть $Ra \geq 6,3$ мкм [2].

К сожалению, в специальной литературе, выглаживанию заготовок из сплавов относительно низкой твердости с высокой вязкостью, уделено значительно меньше внимания по сравнению со сплавами большой твердости, в первую очередь с закаленными сталями. Поэтому определенный практический интерес приобретает знание о технологических параметрах выглаживания сплавов с указанными характеристиками и относительно большой шероховатостью исходной поверхности.

Исходя из изложенного, определена цель выполненной работы: на основе многофакторных экспериментов с применением регрессионного и дисперсионного анализов определить влияние исходной шероховатости с относительно большой высотой микронеровностей профиля на величину деформирующей силы и эффективность процесса выглаживания.

2. Условия проведения эксперимента

В выполненном полном факторном эксперименте (ПФЭ 2^3) факторы устанавливали на двух уровнях. В частности, силу выглаживания (P) изменяли от 60 Н ($X_1 = -1$) до 100 Н ($X_1 = +1$); подачу (S) – от 0,05 мм/об ($X_2 = -1$) до 0,075 мм/об ($X_2 = +1$); и шероховатость исходной поверхности (Ra) – от 2,0 мкм ($X_3 = -1$) до 4,0 мкм ($X_3 = +1$). Тем самым нижний уровень последнего фактора соответствовал рекомендациям, содержащимся в специальной литературе [1], а верхний принят в 2 раза большим.

В качестве отклика (Y) фиксировали шероховатость выглаженной поверхности (R_a^B). Измерение шероховатости поверхностей выполняли на профилометре-профилографе модели АБРИС — ПМ7.

Ступенчатые валики диаметром 48 мм из стали 20 твердостью $HB = 172$ выглаживали алмазным наконечником с радиусом сферы 3,5 мм при скорости 48 м/мин. В качестве смазочного материала применяли индустриальное масло И20.

Все опыты в эксперименте повторяли по 3 раза и их последовательность рандомизировали.

План ПФЭ 2^3 , содержащий матрицу планирования и результаты измерения шероховатости выглаженных поверхностей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Матрица эксперимента ПФЭ 2^3

№	X_1 (P)	X_2 (S)	X_3 (R_a)	R_a , мкм			$\bar{R}_a$, мкм
1	+	+	+	0,78	0,80	0,82	0,80
2	–	+	+	0,48	0,50	0,52	0,50
3	+	–	+	0,96	0,94	0,95	0,95
4	–	–	+	0,45	0,44	0,46	0,45
5	+	+	–	0,42	0,44	0,44	0,43
6	–	+	–	0,46	0,44	0,45	0,45
7	+	–	–	0,36	0,34	0,35	0,35
8	–	–	–	0,42	0,42	0,38	0,40

Обработка результатов эксперимента позволила получить математическую модель в виде следующего уравнения регрессионного анализа [3]:

$$y(R_a^B) = 0,54 + 0,09X_1(P) + 0,003X_2(S) + 0,134X_3(R_a) - 0,021X_1X_2(PS) + 0,109X_1X_3(PR_a) - 0,028X_2X_3(SR_a) - 0,030X_1X_2X_3(PSR_a) \quad (1)$$

В уравнении (1) величина коэффициентов регрессии отражает степень (силу) влияния факторов и эффектов их взаимодействия на отклик – шероховатость выглаженной поверхности – (R_a^B). Знаки перед соответствующими коэффициентами отражают характер такого влияния при переходе фактора или взаимодействия факторов с нижнего (-1) на верхний (+1) уровень.

Анализ уравнения (1) показывает, что наибольшее влияние на шероховатость выглаженной поверхности оказывает ее исходная шероховатость (R_a). Влияние этого фактора в 1,45 раза превосходит влияние силы выглаживания (P) и почти в 40 раз влияние подачи (S).

Заслуживает внимания тот факт, что вторым по степени влияния на отклик (R_a^B) является эффект парного взаимодействия силы выглаживания и шероховатости исходной поверхности ($P R_a$). Такое влияние лишь на 20% слабее влияния шероховатости исходной поверхности (R_a).

Регрессионный анализ результатов эксперимента дополнили дисперсионным с целью оценки вариации (дисперсии) отклика (R_a^B), обусловленной влиянием исследуемых

факторов и эффектов их взаимодействия [4]. Результаты дисперсионного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 3. Влияние силы выглаживания на шероховатость

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-отношение
X1	1	0,19800	0,19800	880
X2	1	0,00026	0,00026	1,155
X3	1	0,43200	0,43200	1920
X1 X2	1	0,01126	0,01126	50,04
X1 X3	1	0,28600	0,28600	1271,1
X2 X3	1	0,19260	0,19260	856
X1 X2 X3	1	0,19260	0,19260	856
Ошибка	16	0,00360	0,000225	–
Сумма	23	0,96960	–	–

Примечание: Критическое значение F-отношение $F_{1;16}^{\alpha=0,05} = 4,49$

3. Анализ модели шероховатости выглаженной поверхности

В частности, из результатов дисперсионного анализа следует, что вклад фактора шероховатости исходной поверхности (Ra) в дисперсию отклика (R_a^B) составляет 43,9%, вклад эффекта взаимодействия силы выглаживания и исходной шероховатости ($P Ra$) – 30% и силы выглаживания (P) – 20,6%.

В целом модель (1) объясняет 99,6% вариации отклика и это свидетельствует о том, что при анализе учтены все факторы и их взаимодействия.

Выявленное регрессионным и дисперсионным анализами доминирующее влияние на шероховатость выглаженной поверхности силы выглаживания и шероховатости исходной поверхности, а также эффекта их взаимодействия диктует целесообразность рассмотреть модели регрессионного анализа как для относительно низкой ($Ra = 2,0$ мкм), так и высокой ($Ra=4,0$ мкм) шероховатости исходных поверхностей.

Для исходной поверхности с шероховатостью $Ra = 2,0$ мкм (опыты 5...8, табл. 1) получено следующее уравнение регрессионного анализа:

$$y(R_a^B) = 0,41 - 0,018X_1(P) + 0,032X_2(S) + 0,010X_1X_2(PS) \quad (2)$$

Подобное уравнение для исходной шероховатости $Ra=4,0$ мкм (опыты 1...4, табл. 1) имеет вид:

$$y(R_a^B) = 0,675 + 0,20X_1(P) - 0,025X_2(S) - 0,050X_1X_2(PS) \quad (3)$$

Сравнивая (2) и (3), прежде всего, следует отметить, что при увеличении шероховатости исходной поверхности с $Ra = 2,0$ мкм до 4,0 мкм, знаки перед одноименными коэффициентами регрессии меняются на противоположные и, следовательно, принципиально изменяется характер влияния силы выглаживания, подачи и эффекта их взаимодействия на шероховатость выглаженной поверхности.

В частности, анализируя (2) видно, что при относительно малой высоте микронеровностей профиля исходной поверхности наибольшее влияние на отклик (R_a^B) – шероховатость выглаженной поверхности, – оказывает подача. Ее влияние в 1,8 раза больше влияния силы выглаживания и более чем в 3 раза сильнее влияния эффекта взаимодействия этих факторов.

Более сильное влияние подачи по сравнению с влиянием силы выглаживания говорит о том, что ее нижний уровень (60Н) близок оптимальной величине. Ее увеличение в 1,6 раза при переходе на верхний уровень (100Н) уменьшает шероховатость выглаженной поверхности лишь на 5...12% в зависимости от величины подачи. При увеличении подачи от 0,05 мм/об (–1) до 0,075 мм/об (+1) шероховатость выглаженной поверхности возрастает на 12,5...22,8% в зависимости от величины силы выглаживания. Влияние на отклик (R_a^B) эффекта взаимодействия (PS) проявляется в том, что с увеличением силы выглаживания, влияние подачи возрастает.

Дисперсионный анализ результатов ПФЭ 2^2 (опыты 5...8, табл.1) выявил, что 64% дисперсии отклика определяется вкладом фактора подачи, 22% – вкладом силы выглаживания и 13% эффектом взаимодействия этих факторов.

Во втором случае (3), при относительно большой высоте микронеровностей профиля исходной поверхности ($Ra = 4,0$ мкм), доминирующее влияние на шероховатость выглаженной поверхности оказывает сила выглаживания. С ее увеличением от 60Н до 100Н отклик (R_a^B) не только не уменьшается, а напротив, увеличивается. Влияние силы выглаживания в 8 раз больше влияния подачи и в 4 раза – влияния эффекта взаимодействия этих факторов. При этом, увеличение подачи с 0,05 мм/об до 0,075 мм/об приводит к уменьшению шероховатости выглаженной поверхности. Взаимное влияние силы и подачи проявляется в том, что с увеличением силы выглаживания, увеличение подачи уменьшает шероховатость выглаженной поверхности.

Дисперсионный анализ результатов ПФЭ 2^2 (опыты 1...4, табл.1) показывает, что почти 90% дисперсии отклика (R_a^B) обусловлено влиянием силы выглаживания.

Таким образом, можно заключить, что выглаживание поверхности с шероховатостью $Ra = 4,0$ мкм по сравнению с $Ra = 2,0$ мкм не только принципиально меняет характер влияния силы выглаживания и подачи на шероховатость выглаженной поверхности, но и степень такого влияния. В частности, если в первом случае ($Ra = 2,0$) доминирующим фактором является подача, то во втором – сила выглаживания.

Влияние шероховатости исходной поверхности на величину силы выглаживания и шероховатость выглаженной поверхности для большей наглядности анализа иллюстрирует таблица 3, являющаяся фрагментом таблицы 1.

Таблица 3. Влияние силы выглаживания на шероховатость

P=60Н				P=100Н			
№	S мм/об	Ra мкм	R _a ^B мкм	№	S мм/об	Ra мкм	R _a ^B мкм
1	0,075	4,0	0,5	1	0,075	4,0	0,80
2	0,05	4,0	0,45	2	0,05	4,0	0,95
3	0,075	2,0	0,45	3	0,075	2,0	0,43
4	0,05	2,0	0,40	4	0,05	2,0	0,35

Данные приведенные в таблице 3 свидетельствуют, что несмотря на существенное различие шероховатости исходных поверхностей, если сила выглаживания установлена на нижнем уровне (60Н), тогда шероховатости выглаженных поверхностей различаются весьма незначительно. Вследствие этого эффективность выглаживания (R_a/R_a^B) поверхности с большей исходной шероховатостью составит 8,8 а с меньшей – 5.

Как следует из второй части таблицы 3 эффективность выглаживания поверхности с меньшей шероховатостью может быть увеличена до 5,7...6,0 в результате увеличения силы выглаживания до 100Н.

Аналогичное увеличение силы для выглаживания поверхности с исходной шероховатостью $Ra = 4,0$ мкм приводит к нежелательному увеличению шероховатости.

Таким образом, увеличение в 2 раза высоты микронеровностей профиля исходной поверхности оказывает решающее влияние на величину оптимальной силы выглаживания, и объясняется с позиции технологической деформируемости металлических сплавов следующим образом. Известно, что пластичность и сопротивление деформации сплавов зависят от схемы действующих напряжений в очаге пластической деформации. С увеличением в схеме сжимающих напряжений пластичность и сопротивление пластической деформации возрастают, а при растягивающих – уменьшаются [6].

При выглаживании микронеровностей относительно малой высоты ($Ra = 2,0$ мкм) их деформирование осуществляется осадкой с преобладанием сжимающих напряжений [5,6]. По этой причине даже при значительном увеличении силы выглаживания ресурс пластичности достаточно велик. Если высота неровностей профиля относительно велика ($Ra = 4,0$ мкм) их деформирование в большей степени осуществляется изгибом, и в меньшей – осадкой. В результате деформации изгиба преобладают растягивающие напряжения, снижающие ресурс пластичности сплава и уменьшающие его сопротивление деформированию. Поэтому увеличение силы выглаживания сверх оптимальной величины приводит к исчерпанию ресурса пластичности материала детали и проявляется в виде «шелушения» ее поверхности – увеличения шероховатости по сравнению с выглаживанием оптимальной силой.

Заключение

На основе выполненных экспериментов показано, что детали из мягких низкоуглеродистых сталей, с относительно большой шероховатостью исходной поверхности ($Ra \geq 4,0$ мкм) целесообразно эффективно выглаживать алмазом. В результате высота микронеровностей уменьшается в 8...9 раз.

При алмазном выглаживании поверхностей с относительно большой высотой микронеровностей ($Ra \geq 4,0$ мкм) оптимальная сила выглаживания в 1,5..1,7 раза меньше силы выглаживания поверхностей с относительно меньшей высотой микронеровностей ($Ra \leq 2,0$ мкм). Это предопределено наличием в схеме напряженного состояния растягивающих напряжений, снижающих пластичность и сопротивление пластической деформации материала в процессе деформирования микровыступов профиля поверхности.

Выглаживание поверхностей с относительно низкой шероховатостью ($Ra \leq 2,0$ мкм) отличается большей «устойчивостью» к возможному превышению оптимальной силы выглаживания по сравнению с выглаживанием поверхностей с большей шероховатостью ($Ra \geq 4,0$ мкм). В последнем случае вследствие меньшего ресурса пластичности материала деталей подобное превышение оптимальной силы ограничено увеличением шероховатости поверхности.

Список литературы

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Luo H., Liub J., Wangb L., Zhonga Q. Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools // Journal of Materials Processing Technology. 2006. Is. 1-3. P. 9-16. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2005.03.041](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.041)
3. Суслов А.Г., Базров Б.М., Безъязычный В.Ф., Авраамов Ю.С. Научные технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
4. Суслов А.Г., Гуров Р.В., Ташевских Е.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 2. С. 20-22.
5. Губанов В.Ф. Параметры шероховатости выглаженных поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 11. С. 6-9.
6. Балабанов А.Н. Технологичность конструкций машин. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
7. Гуров Р.В. Взаимосвязь режимов обработки и геометрических параметров инструмента с параметрами качества поверхностного слоя при отделочно-упрочняющих режимах поверхностного и пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 8. С. 5-8.

8. Губанов В.Ф. Статистическое управление процессом алмазного выравнивания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 2. С. 17-19.
9. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.
10. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. Киев: Наукова думка, 1992. 184 с.
11. Смелянский В.М. Механика упрочнения поверхности деталей пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
12. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

Effect of Initial Surface Roughness on the Force of Diamond Smoothing

F.I. Antonyuk¹, V.V. Kalmykov^{1,*}, V.A. Fedorov¹

[*sorat-vad@yandex.ru](mailto:sorat-vad@yandex.ru)

¹ Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga,
Russia

Keywords: surface plastic deformation, diamond smoothing, the surface roughness height of the surface roughness, the efficiency smoothing

The article presents study results of one of the diamond smoothing technology methods. Force is the main technological parameter to define a degree of hardening and smoothing efficiency. The hardening and smoothing effects also depend on the feed rate, which determines a multiplicity of the smoothing force application in each point of machined surface. The range of force widely varies depending on the hardness of the processed alloy. Feed is characterized by quite narrow range that does not depend on the force. The influence of these two parameters on the characteristics of smoothed layer is fairly studied and reflected in the reference literature. Equally important parameter of diamond smoothing technology is roughness of initial surface. This parameter is restricted by the limited height of the surface roughness of original profile. In particular, for smoothing the relatively soft materials the initial surface roughness parameter is limited by the value $R_a \leq 2,0$ micron. Such roughness is difficult to reach when machining the toughened low carbon steels. Generally, it is much more than ($R_a \geq 6,3$ micron).

In order to study how the initial surface roughness with a great height of the profile surface roughness ($R_a = 4,0$ micron) affects the value of the optimum force and smoothing efficiency, a full factorial experiment has been conducted. Investigations were carried out to find out how the force, feed, and roughness of the initial surface effects on the roughness of smoothed one. Methods of mathematical statistics have identified both a dominant influence of the initial surface roughness and a significant effect of interaction between the initial surface roughness and the smoothing force on the roughness of smoothed surface. It is determined that the value of the optimal force of smoothing surface with a relatively low roughness ($R_a = 2,0$ micron) is significantly, 1.6 times, more than the force of the smoothing surface with roughness $R_a = 4,0$ micron.

References

1. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: Spravochnik* [Hardening and finishing details by surface plastic deformation: a Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p. (in Russian).

2. Luo H., Liub J., Wangb L., Zhonga Q. Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, is. 1-3, pp. 9-16. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2005.03.041](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.041)
3. Suslov A.G., Bazrov B.M., Bez"yazychnyy V.F., Avraamov Yu.S. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [High-tech in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 528 p. (in Russian).
4. Suslov A.G., Gurov R.V., Tashevskikh E.S. Methodical bases of program calculation of the mode of loading of dynamic stabilization of frictional disks. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2009, no. 2, pp. 20-22. (in Russian).
5. Gubanov V.F. Parameters of a roughness of the burnished surfaces. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2010, no. 11, pp. 6-9. (in Russian).
6. Balabanov A.N. *Tekhnologichnost' konstruktsey mashin* [Manufacturability of machines design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 336 p. (in Russian).
7. Gurov R.V. Interaction of modes of treatment and geometric parameters of a tool with parameters of quality in the surface layer of finishing and finishing hardening regimes finishing and strengthening treatment surface-hardening plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2010, no. 8, pp. 5-8. (in Russian).
8. Gubanov V.F. Statistical process control diamond burnishing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2009, no. 2, pp. 17-19. (in Russian).
9. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov* [Process optimization of technology of metals using design of experiments]. Moscow, Mashinostroenie Publ.; Sofiya, Tekhnika Publ., 1980. 304 p. (in Russian).
10. Ryzhov E.V., Gorlenko O.A. *Matematicheskie metody v tekhnologicheskikh issledovaniyakh* [Mathematical methods in technological research]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 184 p. (in Russian).
11. Smelyanskiy V.M. *Mekhanika uprochneniya poverkhnosti detaley plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of surface hardening of details by plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p. (in Russian).
12. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 423 p. (in Russian).