

PACS numbers: 45.20.dg, 46.35.+z, 62.20.fq, 81.40.Ef, 81.40.Lm, 81.65.Ps

## **Исследование и оптимизация технологии алмазного выглаживания деталей из нержавеющей сталей для авиационных двигателей и агрегатов**

А. И. Долматов, А. А. Кабатов\*, М. А. Курин

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»,  
ул. Чкалова, 17,  
61070 Харьков, Украина  
\*Государственное предприятие  
«Харьковский машиностроительный завод «ФЭД»»,  
ул. Сумская, 132,  
61023 Харьков, Украина*

Работа посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности процесса алмазного выглаживания путём снижения теплонапряжённости за счёт управляемого воздействия на энергосиловые характеристики процесса. Установлена функциональная связь между мощностью деформирования и параметрами режима обработки при алмазном выглаживании. На основании комплексных теоретико-экспериментальных исследований разработаны рекомендации по оптимизации и расширению технологических возможностей процесса алмазного выглаживания деталей из коррозионностойких сталей различных классов.

Роботу присвячено вирішенню актуальної задачі підвищення ефективності процесу алмазного вигладжування через зниження теплонапруженості за рахунок керованого впливу на енергосилові характеристики процесу. Встановлено функціональний зв'язок між потужністю деформування та параметрами режиму оброблення при алмазному вигладжуванні. На основі комплексних теоретико-експериментальних досліджень розроблено рекомендації щодо оптимізації та розширення технологічних можливостей процесу алмазного вигладжування деталей з корозійностійких сталей різних класів.

This investigation is concerned with an actual problem of efficiency increase of diamond smoothing process by decrease of heat-release rate due to controlled influence on energy–power characteristics of process. Functional relationship between the power of deformation and parameters of the machining conditions

at the diamond smoothing is established. Based on complex theoretical-experimental investigation, recommendations are developed for optimization and enhancement of capability of diamond smoothing process of parts from corrosion-resistant steels of different classes.

**Ключевые слова:** мощность пластической деформации, температурное поле, качество поверхности, алмазное выглаживание, эффективность процесса.

*(Получено 8 августа 2013 г.; окончат. вариант — 8 октября 2013 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных технологий в авиастроении происходит в условиях непрерывного повышения требований к безопасности полетов, а также к надежности и ресурсу наиболее ответственных деталей. Одной из важнейших задач современного авиастроения является повышение качества и конкурентоспособности продукции путем совершенствования финишных методов обработки, оказывающих решающее влияние на характеристики поверхностного слоя наиболее ответственных деталей авиационных двигателей и агрегатов.

Применение абразивных методов, таких как шлифование, хонингование и доводка для отделочной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов позволяет получить необходимую точность и форму деталей, но часто не обеспечивает оптимальное качество поверхностного слоя. Требуемое качество изделий часто достигается с помощью дополнительных способов обработки, к числу которых относятся поверхностное пластическое деформирование (ППД). К таким методам при производстве деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и агрегатов можно отнести алмазное выглаживание, которое благодаря высокой производительности, стабильности процесса обработки, простоте реализации является одним из наиболее используемых и универсальных методов упрочнения. Анализ процессов поверхностного пластического деформирования и их технологических возможностей обеспечения высокого уровня качества деталей, а также высоких требований, предъявляемых к надежности и ресурсу деталей авиационных двигателей и агрегатов, позволил сделать вывод о перспективности метода алмазного выглаживания [1–8].

## 2. ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным препятствием для повышения эффективности алмазного выглаживания является прямо пропорциональная зависимость температуры в зоне контакта от скорости выглаживания.

Общеизвестно, что основным источником теплообразования при различных процессах механической обработки является работа пластической деформации. Для сплошной среды работа деформирования будет определяться через функцию диссипации энергии, которая определяется интенсивностью скоростей деформаций.

В работе [9] представлена структурно-логическая схема, определяющая методы и последовательность теоретических и экспериментальных исследований. Установлено, что наиболее подходящими для расчета процессов пластического деформирования являются методы, основанные на замкнутой системе уравнений механики сплошных сред [10, 11], которые позволяют проводить детальное исследование состояния деформируемого металла в зоне обработки [9–12].

Целью представленных в работе комплексных теоретико-экспериментальных исследований является повышение эффективности процесса алмазного выглаживания путем снижения теплонапряженности за счет управляемого воздействия на энергосиловые характеристики процесса.

Для достижения поставленной цели в работе требуется решение следующих основных задач.

1. Разработка математической модели процесса алмазного выглаживания деталей типа тел вращения.
2. Определение поля скоростей течения частиц металла и скоростей деформаций в зоне деформаций при алмазном выглаживании деталей типа тел вращения.
3. Установление функциональной связи между энергосиловыми характеристиками деформирования и параметрами режима обработки при алмазном выглаживании.
4. Экспериментальные исследования процесса алмазного выглаживания по определению энергосиловых характеристик и влияния режимов на показатели качества поверхностного слоя деталей после обработки.
5. Разработка технологических рекомендаций по оптимизации и расширению технологических возможностей процесса алмазного выглаживания.

Проведенный анализ результатов исследований процессов ППД [13] позволил сделать вывод о перспективности метода алмазного выглаживания. Такие характеристики как высокая производительность, простота реализации и стабильность процесса обработки предопределили алмазное выглаживание одним из наиболее используемых и универсальных методов упрочнения. Установлено, что процесс алмазного выглаживания при интенсивных режимах обработки характеризуется повышенной силовой напряженностью вследствие больших удельных нагрузок в контактной зоне и низкой теплостойкости алмазного инструмента, что является причиной

ухудшения эксплуатационных свойств обработанных деталей и повышенного износа инструмента.

Таким образом, основным препятствием для повышения эффективности алмазного выглаживания является прямо пропорциональная зависимость температуры в зоне контакта от скорости выглаживания. В связи с этим требуется установление функциональной связи между энергосиловыми характеристиками деформирования и параметрами режима обработки.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

#### 3.1. Математическое моделирование процесса

Теоретическое исследование деформированного состояния материала детали при алмазном выглаживании проводилось в цилиндрической системе координат в предположении условий пластического контакта жесткого сферического индентора и деформируемого полупространства. Основные результаты теоретических исследований представлены в работах [12, 14]. Использование структурно-логической схемы, представленной в работе [9] для анализа деформированного состояния материала детали в процессе выглаживания, позволило нам на основании общих уравнений механики сплошных сред получить поле скоростей течения металла в зоне деформирования [14]:

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{AR}{t_k} \sin\left(A\left(1 - \frac{t}{t_k}\right)\right) \frac{St_k}{\pi r} \sin\frac{\pi r}{St_k} \left(1 - \frac{z}{kSt_k}\right)^2, \\ V_r &= \frac{2ARS}{\pi^2 kr} \sin\left(A\left(\frac{t}{t_k} - 1\right)\right) \left(\frac{z}{kSt_k} - 1\right) \left(1 - \cos\frac{\pi r}{St_k}\right), \\ V_\theta &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R$  — радиус индентора,  $t$  — текущее время,  $t_k$  — время деформирования участка обрабатываемой поверхности,  $S$  — скорость продольной подачи,  $A = \arctg([2RH - H^2]^{1/2}[R - H]^{-1})$ ,  $H$  — глубина внедрения индентора,  $r$  и  $z$  — координаты точки в цилиндрической системе координат,  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Интенсивность скоростей деформаций в нашем случае можно найти по формуле:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2} + \frac{3}{2} \varepsilon_{zr}^2. \quad (2)$$

Интенсивность деформаций можно определить из выражения, подобного (2):

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{zz} - e_{rr})^2 + (e_{rr} - e_{\theta\theta})^2 + (e_{\theta\theta} - e_{zz})^2} + \frac{3}{2} e_{zr}^2. \quad (3)$$

Представленные выше выражения позволяют воспроизводить пространственную картину распределения деформаций в металле при алмазном выглаживании, что дает возможность наглядно представить механизм протекания деформаций и упростить анализ деформированного состояния материала. Ключевыми параметрами при определении таких важных энергосиловых характеристик как мощность и работа пластической деформации, а также температуры в зоне контакта алмазного индентора и детали являются интенсивность скоростей деформаций  $\varepsilon_i$  и интенсивность деформаций  $e_i$ .

На рисунках 1 и 2 представлены графики зависимости интенсивности скоростей деформаций  $\varepsilon_i$  и интенсивности деформаций  $e_i$  от координат при следующих значениях параметров:  $z = 0$  мм,  $R = 2$  мм,  $H = 0,45$  мм,  $S = 0,05$  мм/об,  $n = 380$  об/мин (частота вращения детали),  $k = 0,3$  (коэффициент пропорциональности). Область деформации изменяется в пространстве и во времени, а время начала и конца деформации для каждой точки пространственной области зоны обработки соответственно будет:  $t_1 = 0$  и  $t_2 = t_k$ .

Для определения мощности пластической деформации получена

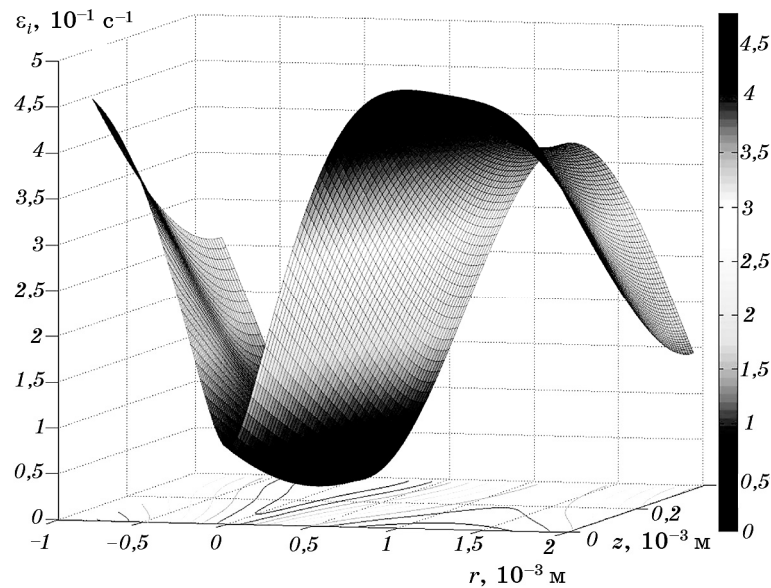


Рис. 1. Интенсивность скоростей деформаций  $\varepsilon_i$ .

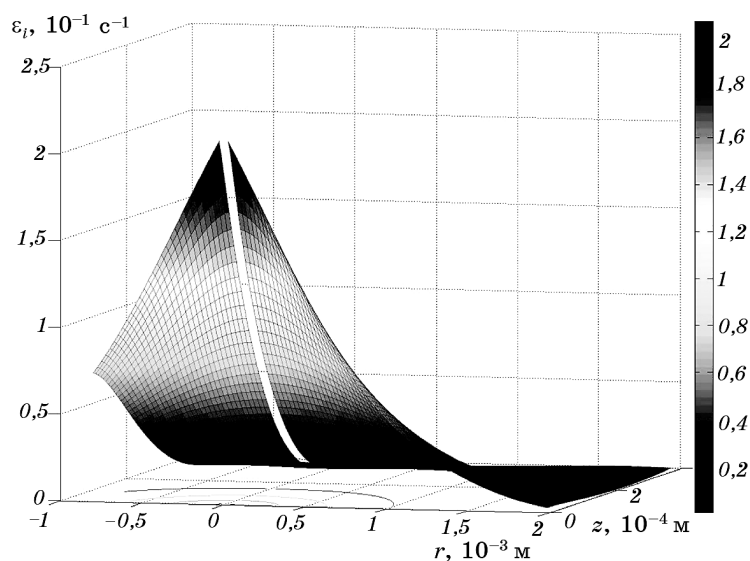


Рис. 2. Интенсивность деформаций  $e_i$ .

формула [12]:

$$N = \iiint_{(V)} \sigma_T e_i^m \varepsilon_i dV, \quad (4)$$

где  $m$  — показатель деформационного упрочнения,  $e_i$  — интенсивность деформаций,  $\sigma_T$  — предел текучести,  $\varepsilon_i$  — интенсивность скоростей деформаций.

Вычисление интеграла (4) после подстановки в него выражений (2) и (3) следует производить численным методом, так как он не выражается в конечном виде через элементарные функции. Для получения графической зависимости  $N_i = f(z_i, r_i)$  для материала 12X18H10T со следующими механическими свойствами:  $\sigma_T = 315$  МПа,  $m = 0,37$  (рис. 3), использовали классическое определение тройного интеграла.

Пространственную область  $(V)$ , охватывающую зону деформирования, разбили на  $n$  частей, где  $\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_n$  — соответствующие объемы, при этом в нашем случае для цилиндрической системы координат:  $\Delta V_i = r_i \Delta r_i \Delta \theta_i \Delta z_i$ . В каждой части взяли по точке и вычислили функцию:

$$N_i = \sigma_T e_i^m(r_i, z_i, \theta_i) \varepsilon_i(r_i, z_i, \theta_i) \Delta V_i.$$

Далее составили сумму:

$$S_n = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n.$$

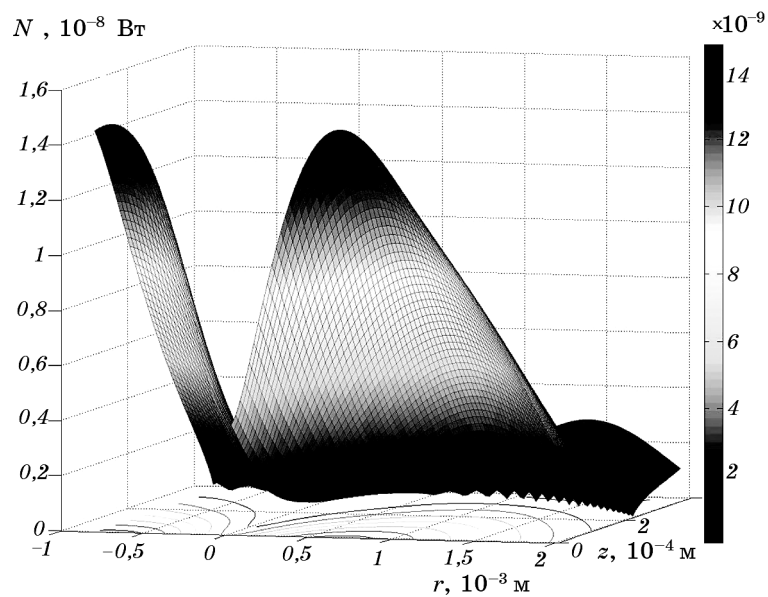


Рис. 3. Изменение мощности деформирования  $N_i$ .

При этом интеграл (4) будет представлять собой предел, к которому стремится  $S_n$ , когда наибольший из диаметров частных областей стремится к нулю.

Вычисление мощности деформирования по выше описанному алгоритму для рассматриваемого нами случая дает следующий результат —  $N \approx 35,21$  Вт.

### 3.2. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Построение тепловой картины алмазного выглаживания на этапе проектирования операции позволяет разработать технологические рекомендации по ведению процесса обработки с учетом важных факторов. К таковым следует отнести предотвращение возможных негативных структурно-фазовых превращений в поверхностном слое выглаживаемой детали, сопровождающихся неотъемлемым ухудшением качества и эксплуатационных характеристик поверхностного слоя, а также уменьшением интенсивности изнашивания инструмента, особенно при отсутствии подачи смазочно-охлаждающих технологических средств в зону обработки.

Для получения выражения, описывающего температурное поле детали, воспользуемся методикой разработанной авторами работы [15].

При описании температурного поля используем известные ана-

литические выражения для полосового быстродвижущегося источника  $\Theta(x, y)$ , температурное поле для которого описывается аналитическим выражением:

$$\Theta(x, y) = UT(\psi, \nu),$$

где  $U = K_{C_1} l_1 q_1 / 2\lambda(\pi \text{Pe})^{0.5}$  — размерный коэффициент,  $T(\psi, \nu)$  — температурное поле в безразмерном виде,  $K_{C_1}$  — поправочный коэффициент,  $q_1$  — плотность теплового потока источника на первом участке контакта (участке пластической деформации) [15],  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности детали,  $x, y$  — абсцисса и ордината точки М, для которой рассчитывается температура,  $\text{Pe} = Vl_1/\omega$  — критерий Пекле,  $V$  — скорость выглаживания,  $l_1$  — длина первого участка зоны контакта индентора и детали (участка пластической деформации) [15],  $\omega$  — коэффициент температуропроводности детали.

Общее распределение безразмерных температур в детали при выглаживании можно найти по формуле

$$T_{\Sigma}(\psi, \nu) = T_1(\psi, \nu) + T_2(\psi, \nu) - T_3(\psi, \nu) - T_4(\psi, \nu), \quad (5)$$

где  $T_1(\psi, \nu)$  — распределение температур в детали, возникающее под действием источника теплоты в зоне пластической деформации,  $T_2(\psi, \nu)$  — распределение температур в детали, возникающее под действием источника теплоты в зоне упругого восстановления,  $T_3(\psi, \nu)$  — распределение температур в детали, возникающее под действием стока теплоты из детали в инструмент на передней поверхности индентора,  $T_4(\psi, \nu)$  — распределение температур в детали, возникающее под действием стока теплоты из детали в инструмент на задней поверхности индентора.

Температуры в детали, возникающие под действием стока теплоты из детали в инструмент на передней и задней поверхностях индентора  $T_3$  и  $T_4$  в формуле (5) отрицательны, так как тепловые потоки  $q_3$  и  $q_4$  направлены противоположно потокам  $q_1$  и  $q_2$ . Следовательно, за счет стока теплоты в инструмент деталь охлаждается.

Безразмерное распределение температур в общем виде можно найти, воспользовавшись формулой:

$$T(\psi, \nu) = \int_0^{\Delta} \frac{f(\psi_u) d\psi_u}{\sqrt{\psi - \psi_u}} \exp\left(-\frac{\text{Pe}}{4} \frac{\nu^2}{\psi - \psi_u}\right),$$

где  $\psi = x/l_1$ ,  $\psi_u = x_u/l_1$ ,  $\nu = y/l_1$ ,  $k = l_2/l_1$ ,  $x_u$  — абсцисса импульса теплоты,  $l_2$  — длина второго участка зоны контакта индентора и детали (участок упругого восстановления) [15],  $\Delta$  — верхний предел интеграла ( $\Delta = \psi$  при  $0 < \psi < 1$  и  $\Delta = 1$  при  $\psi > 1$ ),  $f(\psi_u)$  — закон распреде-



ления плотности теплового потока.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

##### 4.1. Проведение и обработка экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования выполнялись на токарно-винторезном станке 16К20.

В резцедержателе станка устанавливался выглаживатель, с державкой из инструментальной стали 40Х ГОСТ 4543-71, в оправе которой закреплялся кристалл синтетического алмаза цилиндрической формы весом 0,3 карата марки АСПК (индентор).

Диаметр кристалла составлял 6 мм, длина — 10 мм, при этом его рабочий торец был заточен на конус с углом при вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления при вершине — 0,5–0,7 мм.

Схема обработки, а также общий вид экспериментальной установки показаны на рис. 4.

Необходимое усилие прижима определялось сжатием тарированной пружины 3 при помощи регулировочного винта 1. Величина усилия устанавливалась по показаниям шкалы, нанесенной на корпус державки, затем с помощью поперечного суппорта выглаживатель подводился до касания с обрабатываемой деталью и устанавливался натяг 0,2 мм, контролируемый по индикатору ИЧ 10 ГОСТ 577-68 с ценой деления 0,01 мм. Нагрузку изменяли в пределах 50–150 Н при разных количествах проходов: 1, 2 и 4.

Продольная подача суппорта изменялась в пределах 0,01–0,1

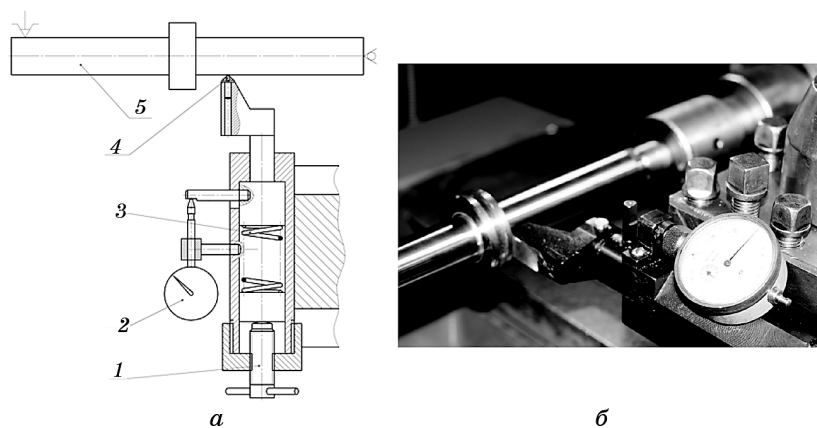


Рис. 4. Экспериментальная оснастка: схема [1] (1 — регулировочный винт, 2 — индикатор, 3 — тарированная пружина, 4 — алмазный наконечник, 5 — обрабатываемая деталь) (а); общий вид (б).

мм/об. Скорость выглаживания составляла 20–180 м/мин.

Измерение эффективной мощности алмазного выглаживания выполнялось при помощи измерительного комплекта К505, предназначенного для измерения напряжения, силы тока и мощности в однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузках фаз.

Оценка физико-механических свойств поверхностного слоя исследуемых образцов по глубине осуществлялась по изменению микротвердости. Микротвердость определялась по общепринятой методике косоугольного шлифа при помощи микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке на индентор 0,5 Н и 1 Н. Измерение микротвердости на косом шлифе выполнялось по двум дорожкам с расстоянием между ними 0,7–0,9 мм. Полученные результаты усреднялись, и по определенным средним значениям строился график изменения микротвердости по глубине.

Остаточные напряжения определялись механическим способом в три этапа: подготовка испытаний, снятие кривых деформаций образцов и расчет остаточных напряжений.

Определение величины и характера распределения остаточных напряжений выполнялось при непрерывном травлении образцов с одновременной автоматической записью кривой их деформации на приборе ПИОН-2 (измерялась стрела прогиба плоского образца). Погрешность записи прибора составляла  $\pm 3\%$ .

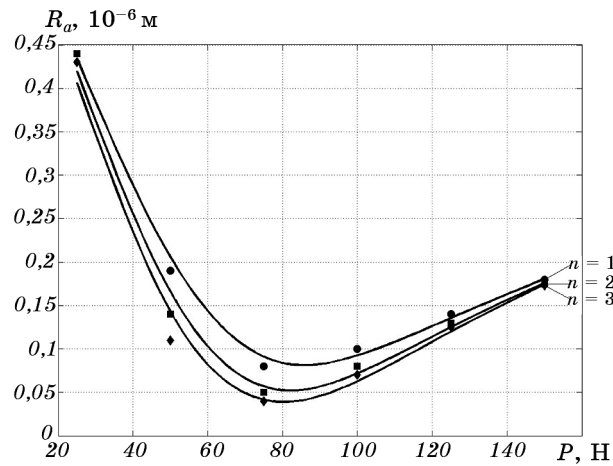
Для проведения исследований были выбраны коррозионностойкие стали 12Х18Н10Т, 95Х18, 14Х17Н2 и 30Х13, которые широко используются в авиадвигателестроении и авиационном агрегатостроении при производстве рабочих лопаток, дисков, валов, фланцев, а также крепежных и других деталей, работающих при температурах до 600°C, а при наличии агрессивных сред — до 350°C.

#### 4.2. Результаты и их обсуждение

Влияние параметров режимов обработки на показатели качества поверхности образцов из стали 12Х18Н10Т представлено на рис. 5–10. Характер изменения показателей других сталей аналогичный. Зависимости, представленные на рис. 5, 6, получены при скорости выглаживания  $V = 20$  м/мин, скорость подачи инструмента  $S = 0,02$  мм/об (рис. 5).

На графиках условно можно выделить три участка (рис. 5, 6): 1 — участок снижения шероховатости от исходной до минимальной, 2 — участок минимальной шероховатости, 3 — участок постепенного увеличения шероховатости.

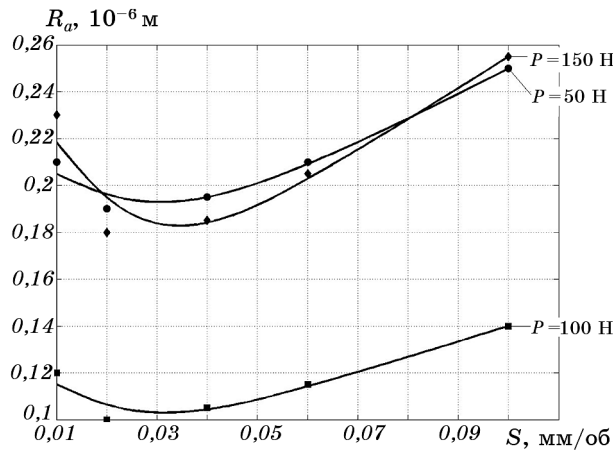
Рассмотрим первый участок. При увеличении силы выглаживания наблюдается постепенное снижение шероховатости. При достижении определенного значения силы прижима уменьшение ше-



**Рис. 5.** Зависимость шероховатости поверхности  $R_a$  от усилия прижима выглаживателя  $P$  при различных количествах проходов для стали 12X18H10T.

роховатости прекращается (рис. 5). При значениях скорости подачи, меньших 0,02 мм/об, шероховатость возрастает по сравнению с оптимальной (рис. 6), что объясняется пластическим искажением микропрофиля и перенаклепом поверхностного слоя вследствие большой кратности приложения нагрузки.

Дальнейшее увеличение силы прижима (2 участок) приводит к увеличению сопротивления поверхностного слоя пластической деформации, что приводит к уменьшению градиента шероховатости



**Рис. 6.** Зависимость шероховатости поверхности  $R_a$  от скорости подачи при одном проходе для материала 12X18H10T.

на фронте падения (рис. 5). В целом, на границах второго участка увеличение силы прижима не вызывает существенного изменения шероховатости. Минимальная шероховатость выглаженной поверхности достигается при определенном сочетании величины подачи инструмента и радиуса закругления рабочей части индентора. В нашем случае для радиуса скругления индентора, равного 0,5 мм, значения минимальной шероховатости достигаются в интервале изменения подачи от 0,02 мм/об до 0,04 мм/об в зависимости от марки материала (рис. 6).

Последующее увеличение силы прижима (третий участок) приводит к возрастанию высоты микронеровностей, что объясняется увеличением величины пластических искажений (рис. 5). Изменение подачи в диапазоне от 0,02 мм/об до 0,1 мм/об на третьем участке приводит к росту шероховатости практически по линейному закону (рис. 6).

Изменение микротвердости и остаточных напряжений по глубине после алмазного выглаживания при одном проходе, при скорости подачи инструмента  $S = 0,02$  мм/об, скорости выглаживания  $V = 20$  м/мин и различных усилиях прижима выглаживателя представлены на рис. 7, 8.

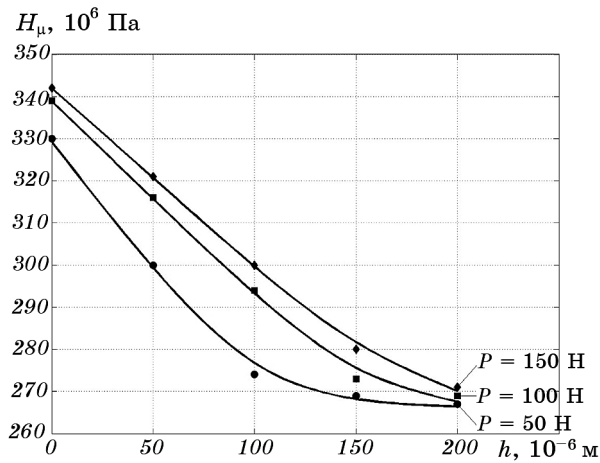
Максимальную микротвердость имеет поверхность выглаженной детали (рис. 7). С увеличением глубины микротвердость убывает и на глубине 0,2–0,25 мм становится равной исходной. Значение поверхностной микротвердости с увеличением сил выглаживания возрастает, причем характер возрастания микротвердости носит явно нелинейный характер.

После выглаживания создаются значительные сжимающие напряжения, достигающие 490–730 МПа в зависимости от марки материала (рис. 8). Глубина залегания сжимающих напряжений в зависимости от усилия прижима и обрабатываемого материала достигает 0,17–0,4 мм.

Следует отметить, что максимальные значения остаточных напряжений достигаются не на поверхности металла, а на некоторой глубине, прямо пропорционально зависящей от усилия прижима индентора, а указанные значения глубины изменяются от 0,07 мм до 0,17 мм.

Скорость алмазного выглаживания мало влияет на величину шероховатости. Так, при изменении скорости от 20 м/мин до 100 м/мин величина шероховатости практически не изменяется. При увеличении скорости выглаживания от 100 м/мин до 170 м/мин шероховатость незначительно увеличивается.

Получены зависимости мощности алмазного выглаживания при одном проходе от подачи инструмента при скорости выглаживания  $V = 20$  м/мин (рис. 9), а также от скорости выглаживания при скорости подачи инструмента  $S = 0,02$  мм/об (рис. 10) для материала

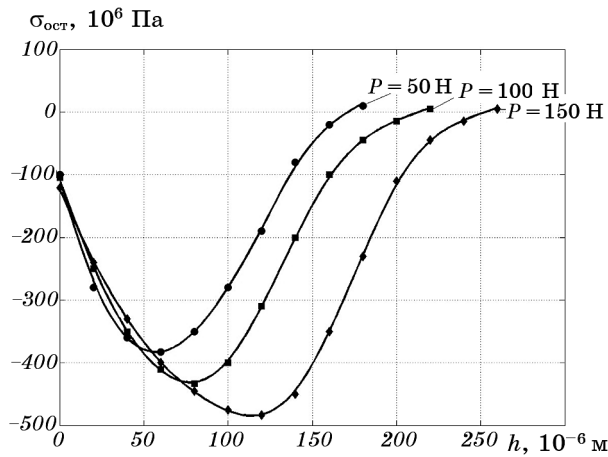


**Рис. 7.** Изменение микротвердости  $H_{\mu}$  поверхностного слоя детали по глубине  $h$  для материала 12X18H10T.

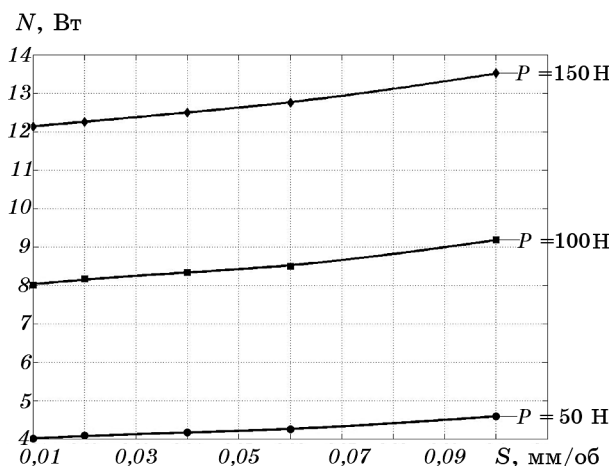
**12X18H10T.**

Анализ графиков зависимости мощности обработки от подачи (рис. 9) показал небольшое увеличение мощности при увеличении подачи, что объясняется уменьшением перекрытия канавок (следов, оставляемых индентором при обработке) и, соответственно, увеличением объема пластически деформируемого материала.

В свою очередь, увеличение скорости алмазного выглаживания (рис. 10) вызывает значительное возрастание мощности обработки.



**Рис. 8.** Изменение остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  в поверхностном слое детали по глубине  $h$  для материала 12X18H10T.

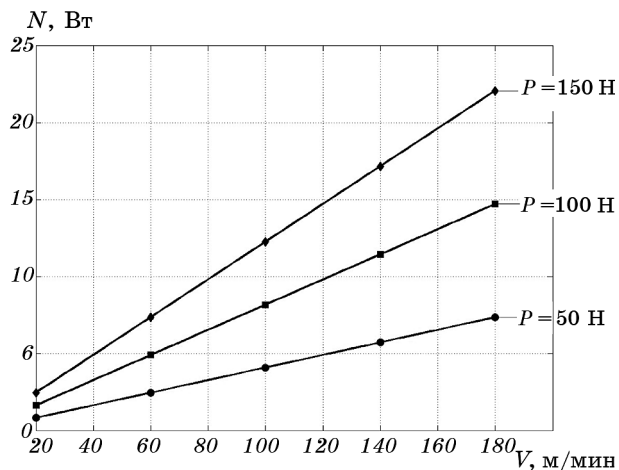


**Рис. 9.** Зависимость мощности  $N$  алмазного выглаживания от скорости подачи  $S$  для материала 12Х18Н10Т.

Это связано с увеличением количества деформируемого металла в единицу времени.

Следует отметить, что результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с теорией.

В результате комплексных экспериментальных исследований установлены оптимальные режимы обработки, обеспечивающие высокое качество поверхностного слоя, которое характеризуется следующими параметрами:



**Рис. 10.** Зависимость мощности  $N$  алмазного выглаживания от скорости выглаживания  $V$  для материала 12Х18Н10Т.

- «площадкой» минимальной шероховатости со значениями  $R_a = 0,08-0,09$  мкм;
- увеличением микротвердости на 25–30% по сравнению с исходной;
- образованием сжимающих остаточных напряжений достигающих значений 490–730 МПа в зависимости от марки материала, глубина залегания которых лежит в диапазоне от 0,07 мм до 0,17 мм.

На основании проведенных комплексных теоретико-экспериментальных исследований разработаны рекомендации по оптимизации и расширению технологических возможностей процесса алмазного выглаживания коррозионностойких сталей:

- для достижения шероховатости  $R_a = 0,04-0,1$  мкм после алмазного выглаживания поверхность деталей необходимо предварительно обработать методами, обеспечивающими шероховатость не выше  $R_a = 0,5$  мкм и геометрию деталей в границах допуска, оговоренного чертежом;
- при необходимости обеспечения шероховатости на уровне  $R_a = 0,08-0,09$  мкм обработка выполняется за один проход, уменьшение шероховатости до уровня  $R_a = 0,04-0,05$  мкм требует выполнения двух проходов;
- минимальные значения шероховатости обеспечиваются при следующих технологических режимах обработки, указанных в таблице.

**ТАБЛИЦА.** Технологические режимы алмазного выглаживания различных сталей.

Параметры обработки и состояния поверхностного слоя	Сталь			
	12X18H10T	14X17H2	95X18	30X13
Усилие прижима выглаживателя $P$ , Н	75–90	100–140	80–105	75–100
Продольная подача инструмента $S$ , мм/об	0,02–0,04	0,02–0,04	0,025–0,04	0,02–0,05
Скорость выглаживания $V$ , м/мин	20–100	20–140	20–120	20–100
Максимальная микротвердость $H_{\mu}$ , МПа	330–340	470–485	410–430	440–445
Максимальные сжимающие остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ , МПа	380–490 (420–435)	630–740 (680–720)	620–730 (650–680)	560–660 (580–610)
Глубина залегания остаточных напряжений $h$ , мкм	60–120 (70–90)	100–160 (120–150)	100–160 (110–140)	100–140 (110–130)

В скобках указаны значения  $\sigma_{ост}$  и  $h$  для оптимальных режимов.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Установлена функциональная связь между мощностью деформирования и параметрами режима обработки при алмазном выглаживании.

2. Проведены экспериментальные исследования влияния технологических режимов обработки на показатели качества поверхностного слоя и на энергетические показатели процесса алмазного выглаживания образцов из коррозионностойких сталей, в результате которых установлено:

– минимальная шероховатость за один проход со значениями  $R_a = 0,08-0,09$  мкм, достигается в зависимости от марки материала при следующих режимах обработки: усилие прижима от 75 Н до 140 Н, подача инструмента 0,02–0,05 мм/об, скорость выглаживания 100–120 м/мин;

– при количестве проходов, равном двум, шероховатость поверхности уменьшается до величины  $R_a = 0,04-0,05$  мкм, дальнейшее увеличение количества проходов практически не влияет на величину шероховатости поверхности.

– на поверхности детали микротвердость возрастает на 25–30% по сравнению с исходной, но с возрастанием глубины поверхностного слоя величина микротвердости уменьшается, и при достижении значений глубины 200–250 мкм микротвердость не превышает 4–7% от ее исходного значения;

– в поверхностном слое образуются остаточные напряжения сжатия, достигающие значений 490–730 МПа, залегающие в зависимости от марки материала и режимов обработки на глубине от 0,07 мм до 0,17 мм; значение этой глубины прямо пропорционально зависит от усилия прижима индентора;

– увеличение силы прижима индентора к обрабатываемой детали, скорости подачи инструмента и скорости выглаживания приводит к возрастанию мощности обработки, наиболее существенное влияние оказывают сила прижима и скорость выглаживания, в то время как влияние скорости подачи инструмента незначительно.

3. На основании комплексных теоретико-экспериментальных исследований разработаны рекомендации по оптимизации и расширению технологических возможностей процесса алмазного выглаживания деталей из коррозионностойких сталей различных классов.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Торбило, *Алмазное выглаживание* (Москва: Машиностроение: 1972).
2. Л. Г. Одинцов, *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник* (Москва: Машиностроение: 1987).
3. N. S. M. El-Tayeb, K. O. Low, and P. V. Brevern, *J. Mater. Process. Technol.*,



- 186: 272 (2007).
4. M. Korzynski, *J. Mater. Process. Technol.*, **209**: 625 (2009).
  5. В. П. Кузнецов, И. Ю. Смолин, А. И. Дмитриев, Д. А. Коновалов, А. В. Макаров, А. Е. Киряков, А. С. Юровских, *Физическая мезомеханика*, **14**, № 6: 87 (2011).
  6. А. В. Титов, *Вестник НТУ КПИ. Машиностроение*, вып. 59: 121 (2010).
  7. А. В. Титов, *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск «Нові рішення в сучасних технологіях»*, № 46: 61 (2011).
  8. А. В. Титов, С. В. Мозговой, А. Я. Качан, *Вестник двигателестроения*, № 4: 90 (2006).
  9. А. А. Кабатов, *Сб. науч. трудов «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов»*, вып. 1 (73): 67 (2013).
  10. Ю. Н. Алексеев, *Вопросы пластического течения металлов* (Харьков: Изд-во ХГУ: 1958).
  11. Ю. Н. Алексеев, *Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием* (Харьков: Изд-во ХГУ: 1969).
  12. А. И. Долматов, А. А. Кабатов, М. А. Курин, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 3 (100): 12 (2013).
  13. А. А. Кабатов, *Сб. науч. трудов «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии»*, вып. 58: 49 (2013).
  14. А. И. Долматов, А. А. Кабатов, М. А. Курин, *Вестник НТУ КПИ. Машиностроение*, № 67: 186 (2013).
  15. Д. Н. Шелкунова, Т. Г. Ивченко, И. А. Петряева, *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*, вып. 39: 85 (2009).