

УДК 621.787.4

Н.В. Рязанова-Хитровская, И.Н. Пыжов, д-р техн. наук, Харьков, Украина

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ ОБРАБОТКИ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ**

*Проведено дослідження напружено-деформованого стану зони обробки при алмазного вигладжування. Особливу увагу приділено встановлення взаємозв'язку еквівалентних напружень в зоні контакту алмазного вигладжувача з поверхнею деталі з умовами обробки. З використанням методу багатofакторного планування експерименту типу В4 встановлена математична модель процесу вигладжування.*

*Ключові слова: алмазне вигладжування, алмазний вигладжувач, оброблювальний матеріал, напружено-деформований стан, еквівалентні напруження, математична модель*

*Проведены исследования напряженно-деформированного состояния зоны обработки при алмазном выглаживании. Особое внимание уделено установлению взаимосвязи эквивалентных напряжений в зоне контакта алмазного выглаживателя с поверхностью детали с условиями обработки. С использованием метода многофакторного планирования эксперимента типа В4 установлена математическая модель процесса выглаживания*

*Ключевые слова: алмазное выглаживание, алмазный выглаживатель, обрабатываемый материал, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, математическая модель*

*The investigations of stress-strain state of the treatment area during diamond burnishing. Particular attention is paid to the establishment of the relationship equivalent stresses in the contact zone with diamond smoother surface of the component with the processing conditions. Using the method of multivariate planning B4 type of experiment set mathematical model of the smoothing process.*

*Keywords: diamond burnishing, diamond smoother, processed material, the stress-strain state, equivalent stresses, mathematical model*

**1. Постановка проблемы.** Изготовление деталей машин и приборов в современных условиях характеризуется высокими требованиями к их точности и надежности при значительном ужесточении условий эксплуатации. Все это требует внедрения новых технологических процессов, например чистовой обработки пластическим деформированием поверхности заготовок с использованием алмазного выглаживателя рабочей частью которого является природный или синтетический алмаз [1-4]. Известно, что затрачиваемая в процессе выглаживания энергия почти вся переходит в тепло, нагревающее деталь и инструмент. Уровень температуры в зоне контакта алмазного выглаживателя (АВ) с обрабатываемым материалом (ОМ) в значительной степени определяет величину контактных напряжений. В результате этого формируется определенное качество обработанной поверхности (шероховатость, наклеп, величина и знак остаточных напряжений, микроструктура поверхностного слоя металла и др.). Таким образом, знание уровня напряжений, которые характеризуют

напряженно-деформированное состояние системы (НДС) «АВ - ОМ» позволит более углубленно характеризовать процессы, которые протекают в этой системе. В связи с этим исследования, направленные на изыскание взаимосвязи между условиями обработки и напряжениями при алмазном выглаживании, следует считать актуальными и важными для различных отраслей промышленности.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросам алмазного выглаживания посвящено большое количество работ, однако в вопросах количественного и качественного влияния режимов на физическое состояние поверхностного слоя отсутствует единое мнение [1]. На настоящий момент уже выполнено значительное число исследований направленных на выявление возможностей повышения эффективности процесса алмазного выглаживания [1-8 и др.]. Наибольшее число из них связаны, во-первых, с самим процессом выглаживания, а во-вторых, с усовершенствованием конструкций и технологии изготовления алмазных выглаживателей. Недостатком таких исследований следует отметить их чисто экспериментальный характер, что связано со значительными материальными затратами. Попыток использовать для этих целей современные методы компьютерных исследований пока только единицы [5].

Анализ показал, что исследования, посвященные вопросам НДС системы «АВ – ОМ» практически отсутствуют, несмотря на имеющиеся современные программные средства, основанные на использовании метода конечных элементов [9]. На основании этого анализа литературных источников была выдвинута гипотеза о возможности установления НДС системы «АВ – ОМ» путем 3D моделирования процесса алмазного выглаживания.

**3. Цель исследования.** Установить особенности формирования НДС системы «АВ – ОМ» путем использования методологии 3D моделирования процесса алмазного выглаживания и теории планирования многофакторного эксперимента.

**4. Материалы исследования.** Основной идеей работы было установление НДС системы «АВ – ОМ» на базе рационального сочетания методологии 3D моделирования процесса алмазного выглаживания и теории планирования многофакторного эксперимента. Известно, что основными факторами формирования НДС системы являются сила прижима выглаживателя ( $P_y$ ) и температура в зоне контакта ( $\Theta$  °С) [9].

В качестве схемы обработки была принята схема с постоянным усилием  $P_y$  прижима алмазного выглаживателя к поверхности ОМ (упругая схема). Т.е. сила прижима есть величина известная и постоянная. Что касается температуры, то для ее определения использовали известную эмпирическую степенную зависимость [7]:

$$\Theta = C_{\Theta} \cdot P_y^{x_{\Theta}} \cdot S^{y_{\Theta}} \cdot V^{z_{\Theta}} \cdot R^{m_{\Theta}} \quad (1)$$

где  $C_{\Theta} = 225$  - коэффициент, отражающий влияние условий обработки на температуру в зоне контакта;  $x_{\Theta}=0,19$ ,  $y_{\Theta}=0,28$ ,  $z_{\Theta}=0,1$ ,  $m_{\Theta}= -0,33$  - показатели степени, отражающие интенсивность влияния соответственно силы  $P_y$ , подачи  $S$ , скорости резания  $V$  и радиуса алмазного выглаживателя  $R$  на величину температуры обработки  $\Theta$ .

Для установления математической модели описывающей НДС системы был реализован дельта оптимальный план второго порядка типа В4. Такая модель имеет входы (независимые факторы  $X_1, X_2, X_3, X_4$ ), и выход  $Y$  (параметр оптимизации). В качестве последнего была принята величина эквивалентных напряжений  $\sigma_{ЭКВ}$ .

Математическая модель в кодированном виде имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_{11}^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 \quad (2)$$

При исследовании процесса алмазного выглаживания в качестве факторов (см. табл. 1 и 2) были приняты: нормальная сила ( $P_y, Н$ ), подача ( $S, мм/об$ ), скорость ( $V, м/мин$ ) и радиус выглаживателя ( $R, мм$ ).

После вычисления по формуле (1) значений температур для 24 вариантов сочетания факторов была создана компьютерная модель процесса алмазного выглаживания в программном пакете SolidWorks, расчеты с использованием которой позволили получить значения эквивалентных напряжений (24 варианта, см. табл. 2). Фрагмент визуализации распределения полей напряжений приведен на рис. 1.

В результате реализации плана было получено следующее уравнение регрессии:

$$Y = 8,286 + 0,883X_1 + 1,822X_2 + 1,107X_3 - 1,497X_4 - 0,211X_1^2 - 0,490X_2^2 - 0,548X_3^2 + 0,569X_4^2 + 0,196X_1X_2 + 0,124X_1X_3 - 0,159X_1X_4 + 0,243X_2X_3 - 0,324X_2X_4 - 0,194X_3X_4 \quad (3)$$

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов плана В4

Уровни факторов	P <sub>y</sub> , Н		S, мм/об		V, м/мин		R, мм	
	Натуральное значение	Кодированное значение	Натуральное значение	Кодированное значение	Натуральное значение	Кодированное значение	Натуральное значение	Кодированное значение
Верхний уровень	245	+1	0,1	+1	600	+1	3	+1
Основной уровень	162	0	0,06	0	320	0	2	0
Нижний уровень	79	-1	0,02	-1	40	-1	1	-1

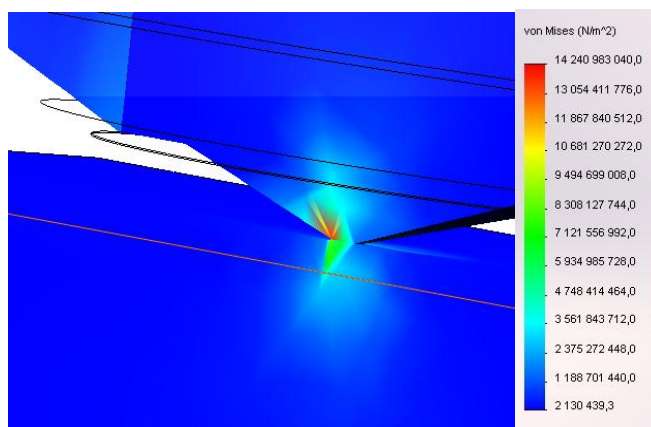


Рисунок 1 - Визуализация распределения полей напряжений в программном пакете COSMOSWorks

Таблица 2 – Условия проведения исследований

Номер опыта	Значения факторов				$\Theta, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{ЭКВ}}, \text{ГПа}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$		
1	1	1	1	1	444	9,75
2	-1	1	1	1	357	7,73
3	1	-1	1	1	282	5,98
1	2	3	4	5	6	7
4	-1	-1	1	1	228	4,72
5	1	1	-1	1	337	7,26
6	-1	1	-1	1	273	5,77
7	1	-1	-1	1	215	4,42
8	-1	-1	-1	1	173	3,44
9	1	1	1	-1	637	14,24
10	-1	1	1	-1	513	11,36
11	1	-1	1	-1	405	8,87
12	-1	-1	1	-1	327	7,03
13	1	1	-1	-1	486	10,73
14	-1	1	-1	-1	392	8,54
15	1	-1	-1	-1	309	6,61
16	-1	-1	-1	-1	250	5,24
17	1	0	0	0	412	9,01
18	-1	0	0	0	332	7,14
19	0	1	0	0	440	9,66
20	0	-1	0	0	280	5,93
21	0	0	1	0	406	8,87
22	0	0	-1	0	309	6,61
23	0	0	0	1	332	7,14
24	0	0	0	-1	479	10,56

Наличие этого уравнения позволяет получить представление о поверхности отклика и дает возможность выявить возможные экстремумы. Это позволяет сделать, например, разработанная на кафедре ИТМ им. М. Ф. Семко НТУ «ХПИ» программа в компьютерном пакете Maple 14.

Для изучения влияния силы прижима алмазного выглаживателя на 3D НДС зоны обработки проведена серия теоретических экспериментов, где варьировались значения основные факторы.

По результатам эксперимента были построены трехмерные и двумерные зависимости, некоторые из которых представлены на рис. 2.

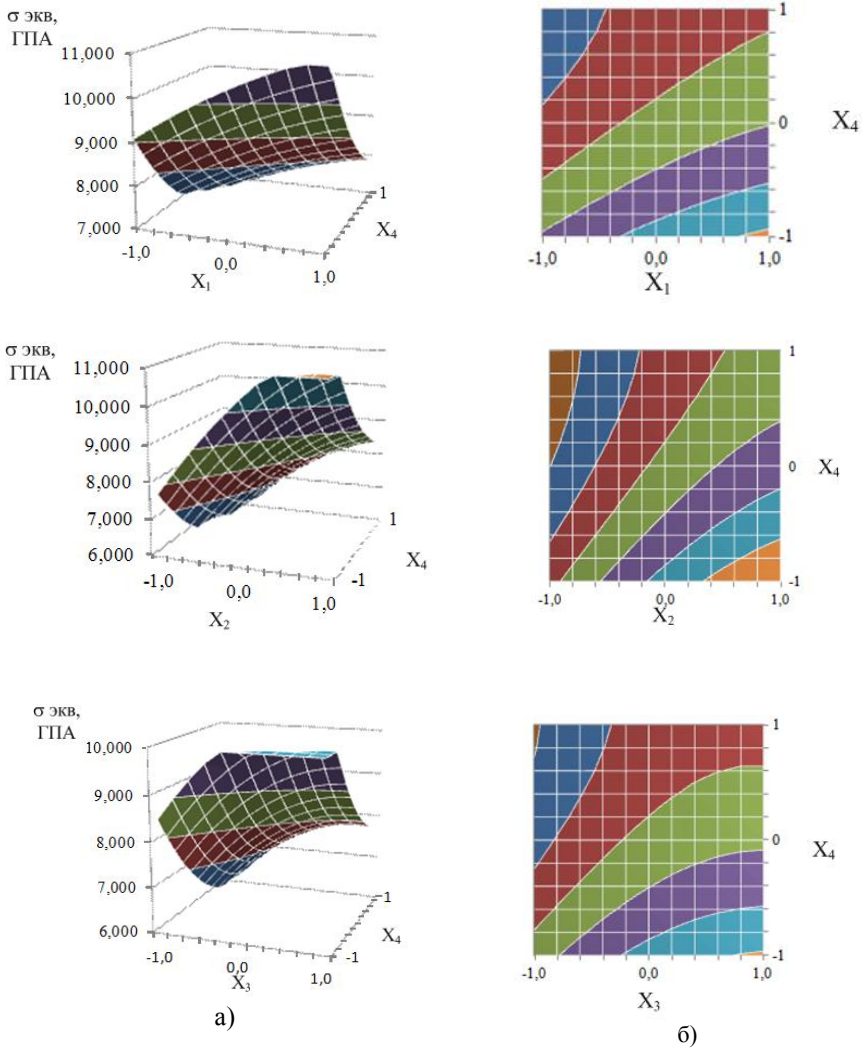
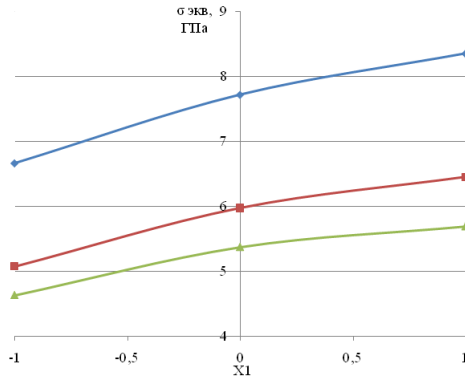


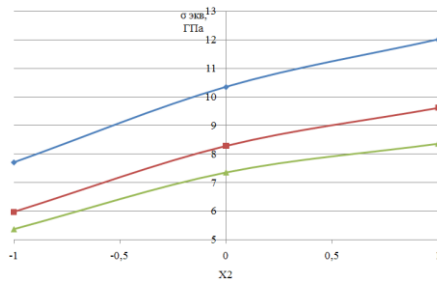
Рисунок 2 – Трехмерные (а) и двумерные (б) зависимости в координатах:

$$\sigma_{\text{экв}} = f(P_y, R); \sigma_{\text{экв}} = f(S, R); \sigma_{\text{экв}} = f(V, R), \text{ при} \\ S = 0,02 \text{ мм/об}; V = 320 \text{ м/мин}; P_y = 162 \text{ Н}$$

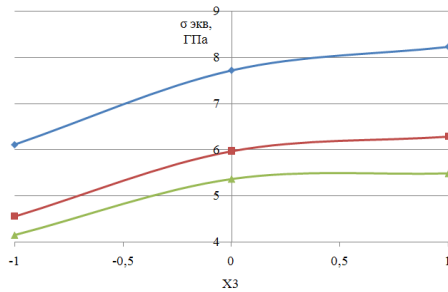
Фрагмент одномерных зависимостей представлен рис. 3.



а) при X2= -1; X3=0



б) при X3=0; X1=0



в) при X2= -1; X1=0

Рисунок 3 – Эпюры распределения полей напряжений:

а) -  $\sigma_{\text{экв}} = f(P_y, R)$ ; б) -  $\sigma_{\text{экв}} = f(S, R)$ ; в) -  $\sigma_{\text{экв}} = f(V, R)$

—◆— R = 1мм; —■— R = 2мм; —▲— R = 3мм

Полученная математическая модель процесса позволяет производить расчеты  $\sigma_{экр}$  в том числе с выявлением экстремальных значений параметра оптимизации.

**Выводы и перспективы развития.** На основании проведенных исследований можно сделать выводы:

1. - С увеличением усилия прижима выглаживателя, скорости обработки и подачи, а также при снижении величины радиуса выглаживателя значения  $\sigma_{экр}$  растут, что объясняется увеличением теплонапряженности процесса обработки;

2. - Полученная математическая модель процесса позволяет рассчитывать значения  $\sigma_{экр}$  для конкретного сочетания факторов а также установить условия, при которых критерий оптимизации будет иметь экстремальные значения.

В дальнейшем планируется установить взаимосвязь между  $\sigma_{экр}$  и качеством обработанной поверхности изделий.

**Список использованных источников:** 1. Хрульков В. А. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении / В. А. Хрульков, А. Я. Головань, А. И. Федотов. – М.: Машиностроение, 1977. – 223 с. 2. Торбило В. М. Алмазное выглаживание [Текст] / В. М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с. 3. Титов В. А. Некоторые перспективные направления развития процессов выглаживания конструкционных материалов / Титов В. А., Титов А. В. // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2009. - № 32. – С. 78-86. 4. Мозговой В. Ф. Оценка оптимизированных технологических параметров процесса алмазного выглаживания при изготовлении валов ГТД / Мозговой В. Ф., Качан А. Я., Титов В. А. и др. // Технологические системы, 2001. – № 5(11). – С.78-85. 5. Титов А. В. Моделирование процесса алмазного выглаживания с использованием системы ANSYS / А. В. Титов, С. В. Мозговой, А. Я. Качан // Вестник двигателестроения. – 3.: ОАО «Мотор Сич», 2006. - № 4. – С. 90 – 96. 6. Титов А. В. Повышение эффективности выглаживания различных конструкционных материалов за счет управления скоростными и силовыми параметрами нагружения инструмента / А. В. Титов // Вестник НТУ КПИ. Машиностроение. – К.: НТУ КПИ, 2010. – Вып. 59. – С. 121 – 125. 7. Скуратов Д. Л. Разработка математической модели для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания и растачивания при изготовлении деталей авиационной техники / Д. Л. Скуратов, С. Ю. Сидоров // РК техника. Сер. XII. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. Научно – технич. сб. Самара, 2006. Вып. 1. С. 182-193. 8. Путьятина Л. И., Тимофеева Л. А., Федченко И. И. Управление качеством поверхности при алмажном выглаживании деталей из высокопрочного чугуна / Л. И. Путьятина, Л. А. Тимофеева, И. И. Федченко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - 2011. - №54 - С. 114-117. 9. Грабченко А. И. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович // – Харьков: НТУ «ХПІ», 2006. – 364с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Hrul'kov V. A. Almaznye instrumenty v precizionnom priborostroenii / V. A. Hrul'kov, A. Ja. Golovan', A. I. Fedotov. – М.: Mashinostroenie, 1977. – 223 s. 2. Torbilo V. M.



Almaznoe vyglazhivanie [Tekst] / V. M. Torbilo. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 105 s. **3.** Titov V.A. Nekotorye perspektivnye napravlenija razvitiya processov vyglazhivaniya konstrukcionnyh materialov / Titov V.A., Titov A.V. // Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. – Harkiv: NTU «HPI» - 2009. - № 32. – S. 78-86. **4.** Mozgovoj V.F. Ocenka optimizirovannyh tehnologičeskikh parametrov processa almaznogo vyglazhivaniya pri izgotovlenii valov GTD / Mozgovoj V.F., Kachan A.Ja., Titov V. A. i dr. // Tehnologičeskie sistemy, 2001. – № 5(11). – С.78-85. **5.** Titov A.V. Modelirovanie processa almaznogo vyglazhivaniya s ispol'zovaniem sistemy ANSYS / A.V. Titov, S.V. Mozgovoj, A.Ja. Kachan // Vestnik dvigatelestroenija. – Z.: OAO «Motor Sich», 2006. - № 4. – S. 90 – 96. **6.** Titov A.V. Povysenie jeffektivnosti vyglazhivaniya različnyh konstrukcionnyh materialov za schet upravlenija skorostnymi i silovymi parametrami nagruženija instrumenta / A.V. Titov // Vestnik NTU KPI. Mashinostroenie. – K.: NTU KPI, 2010. – Vyp. 59. – S. 121 – 125. **7.** Skuratov D. L. Razrabotka matematičeskoj modeli dlja opredelenija racional'nyh uslovij obrabotki na operacijah almaznogo vyglazhivaniya i rastachivaniya pri izgotovlenii detalej aviacionnoj tehniki / D. L. Skuratov, S. Ju. Sidorov // RK tehnika. Ser. XII. Raschet, proektirovanie, konstruirovanie i ispytaniya kosmičeskikh sistem. Nauchno – tehnič. sb. Samara, 2006. Vyp. 1. S. 182-193. **8.** Putjatina L.I., Timofeeva L.A., Fedchenko I.I. Upravlenie kachestvom poverhnosti pri almaznom vyglazhivanii detalej iz vysokopročnogo čuguna / L.I. Putjatina, L.A.Timofeeva, I.I. Fedchenko // Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. - 2011. - №54 - S. 114-117. **9.** Grabchenko A. I. 3D modelirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija / A. I. Grabchenko, V. L. Dobroskok, V. A. Fedorovich // – Har'kov: NTU «HPI», 2006. – 364s.