

УДК 621.923.1

DOI 10.18698/0536-1044-2016-4-71-81

# Моделирование прижогов при шлифовании закаленных деталей из стали 30ХГСА

Я.И. Солер, Нгуен Ван Ле, Д.Ю. Казимиров

ИрННТУ, 664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83

## Modeling of Burns When Grinding Hardened 30KhGSA Steel Parts

Y.I. Soler, Nguyen Van Le, D.Y. Kazimirov

Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St, Bldg. 83

@ e-mail: solera@istu.irk.ru, nhattle007@gmail.com

**i** Выполнен поиск моделей множественного дисперсионного анализа (МДА) на базе  $D$ -оптимального плана для предсказания количественного содержания прижогов и микротвердости поверхностей деталей из закаленной стали 30ХГСА при шлифовании абразивным кругом *Norton Quantum 5NQ46I6VS3*, который показал наилучшую режущую способность в условиях использования нечеткой логики по мерам положения и рассеяния для шероховатостей и точности формы. Полученные модели адекватны в факторном пространстве: продольная подача  $s_{пр} = 5...15$  м/мин, поперечная подача  $s_{п} = 2...10$  мм/двойной ход, глубина резания  $t = 0,005...0,02$  мм, операционный припуск  $z = 0,1...0,3$  мм (скорость резания  $v_k = 35$  м/с). Путем количественной оценки прижогов с привлечением цифровых технологий выявлено значимое влияние продольной ( $A, A^2$ ) и поперечной ( $B, B^2$ ) подачи, припуска ( $D$ ) и взаимодействий первого порядка:  $AB, BD$ . Модели МДА по микротвердости представлены только продольной подачей ( $A, A^2$ ). Установлено, что наиболее значимыми технологическими факторами являются подачи  $s_{пр}$  и  $s_{п}$ . В частности, детали из стали 30ХГСА следует шлифовать при  $s_{пр} \geq 10...12$  м/мин. Возрастание операционного припуска при черновом шлифовании благоприятствует снижению прижогов. Для повышения производительности его съема следует работать при наибольшей глубине  $t = 0,015...0,02$  мм, которая в факторном пространстве оказалась незначимой в регрессиях по прижогам. Снижение микротвердостей в областях наибольших прижогов свидетельствует о том, что они являются следствием разупрочнения поверхности без вторичной закалки.

**Ключевые слова:** моделирование, шлифование, прижоги, микротвердость, цифровые технологии, поверхность отклика.

**i** The multiple dispersion analysis (MDA) models based on a  $D$ -optimal plan were developed for predicting the quantitative content of the burns and microhardness of the parts surfaces made of hardened steel 30KhGSA when grinding by abrasive Norton Quantum wheel 5NQ46I6VS3. It showed the best cutting capacity under fuzzy logic conditions with regards to position and dispersion measures for roughness and form accuracy. The models obtained are adequate in the factor space: longitudinal feed  $s_l = 5-15$  m/min, cross feed  $s_c = 2-10$  mm/double pass, cutting depth  $t = 0.005-0.02$  mm, operational allowance  $z = 0.1-0.3$  mm (cutting speed  $v_w = 35$  m/s). The method of quantitative evaluation of the burns with the application of digital technologies can be used to detect a significant effect of the longitudinal feed ( $A, A^2$ ) and cross feed ( $B, B^2$ ), allowance ( $D$ ) and the first order interactions:  $AB, BD$ . MDA models with regards to microhardness are represented only by

the longitudinal feed ( $A, A^2$ ). It has been established that the sl and sc feeds are the most significant technological factors. In particular, 30KhGSA steel parts should be ground at  $s_l \geq \geq 10\text{--}12$  m/min. The increase in the operational allowance in rough grinding is conducive to the reduction of burns. To improve the removal allowance productivity, grinding should be done at the maximum cutting depth  $t = 0.015\text{--}0.02$  mm, which is insignificant in regressions to burns in the factor space. The reduction of microhardness in the areas of the greatest burns indicates that the grinding burns are the result of the surface softening without re-hardening.

**Keywords:** modeling, grinding, burns, microhardness, digital technology, response surface.

Среднелегированная конструкционная высококачественная сталь 30ХГСА была разработана советскими учеными ВИАМ — И.И. Сидориным и Г.В. Акимовым. Она представляет собой улучшаемую сталь, которая после закалки и высокого отпуска при температуре 550...660 °С получает высокие механические свойства. Сталь 30ХГСА была разработана для самолетостроения, где ее используют в крепежных деталях, работающих при низких температурах; сварных конструкциях, испытывающих знакопеременные нагрузки и т. д. В общем машиностроении ее применяют для: лопаток компрессорных машин, эксплуатируемых при температуре до 400 °С; различных валов, осей, корпусов и др. [1]. Все эти детали должны иметь высокое качество изготовления, которое гарантируется шлифованием. Однако шлифование закаленных деталей высокой прочности жесткими абразивными инструментами имеет один существенный недостаток — появление прижогов, приводящих к значительному снижению твердости обработанной поверхности, усталостной прочности, износоустойчивости и, как следствие, долговечности деталей машин [2]. В связи с этим обеспечение условий бесприжогового шлифования закаленных деталей и количественное регулирование возникающих прижогов являются актуальной задачей современной металлообработки.

В работах [3, 4] прижоги классифицированы на две группы: закалки и отпуска. В первом случае в результате нагрева металла выше линии  $A_{c1}$  (границы превращения перлита в аустенит) образующийся при шлифовании аустенит при остывании деталей не достигает полного обратного мартенситного превращения. Это связано с тем, что в результате больших удельных давлений, оказываемых абразивными зёрнами на поверхности деталей, и из-за скорости движения теплового источника нижняя граница мартенситного превращения смещается ниже 20 °С. На ее поверхности фикси-

руется структура аустенита закалки, который может иметь две схемы превращения: диффузионную «мартенсит — перлит — аустенит», бездиффузионную «мартенсит — аустенит». В первом случае происходит выход углерода из кристаллической решетки мартенсита в зоне температуры отпуска, а при дальнейшем повышении нагрева — превращение мартенсита в ферритно-карбидную смесь ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ) и растворение углерода в  $\gamma$ -Fe, т. е. образование аустенита. Бездиффузионная схема обратного мартенситного превращения предполагает только сдвиг кристаллической решетки при минимальном времени воздействия теплового источника (10...11 с). Прижоги второй группы протекают в третьем превращении отпуска, когда углерод полностью выходит из решетки мартенсита. При этом образуется феррит, а в результате реакции между ним и выделившимся углеродом — цементит (перлит).

В работе [5] дается нечеткая модель для прогнозирования прижогов шлифованных поверхностей, включающая в себя 37 абсолютных и 8 относительных правил и позволяющая получать быстрые ответы в режиме реального времени интеллектуального управления прижогами. В работах [6, 7] для определения прижогов применяют акустическую эмиссию, которая с помощью пьезоэлектрического датчика преобразуется в электрические сигналы. Полученные результаты используют как входные параметры нечеткой модели для прогнозирования и управления прижогами. В работах [8–10] построены математические модели изменения температуры в зоне резания, которая служит доминирующим источником возникновения прижогов при шлифовании. Недостатком всех этих работ является отсутствие количественной оценки прижогов и математических моделей управления ими.

Цель работы — количественная оценка прижогов в широком интервале факторного пространства и поиск статистических моделей мно-

жественного дисперсионного анализа (МДА) для прогнозирования и автоматического управления прижогами при маятниковом шлифовании плоских деталей из закаленной стали 30ХГСА.

**Методика проведения эксперимента.** Шлифование проводили при следующих постоянных условиях: станок модели 3Г71; абразивный круг 01 250×20×76 5NQ46I6VS3, изготовленный фирмой *Norton* из зерен *NQ (Norton Quantum)*. Этот круг показал наилучшую режущую способность из 16 испытуемых в условиях исполь-

зования нечеткой логики по мерам положения и рассеяния для шероховатостей и точности формы. Скорость круга  $v_k = 35$  м/с; смазочно-охлаждающая жидкость — 5%-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин; объект исследования — образцы из закаленной стали 30ХГСА (предел прочности  $\sigma_B = 1000...1080$  МПа) с размерами  $L \times B \times H = 50 \times 40 \times 40$  мм, шлифуемые по площади  $L \times B$ . Переменные технологические факторы приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Интервалы варьирования и уровни натуральных и нормированных факторов**

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		нижний (-1)	основной (0)	верхний (+1)
A — продольная подача $s_{пр}$ , м/мин	5	5	10	15
B — поперечная подача $s_{п}$ , мм/дв. ход	4	2	6	10
C — глубина резания $t$ , мм	0,0075	0,005	0,0125	0,02
D — операционный припуск $z$ , мм	0,1	0,1	0,2	0,3

*Примечание.* В размерности подачи  $s_{п}$  введено обозначение «дв. ход» — двойной ход.

Таблица 2

**Матрица D-оптимального плана эксперимента**

N	Нормированные уровни факторов				N	Нормированные уровни факторов			
	A	B	C	D		A	B	C	D
1	0	-1	-1	-1	20	-1	+1	0	0
2	-1	0	-1	-1	21	-1	-1	+1	0
3	0	+1	-1	-1	22	0	-1	+1	0
4	+1	+1	-1	-1	23	-1	0	+1	0
5	-1	-1	0	-1	24	+1	0	+1	0
6	+1	-1	0	-1	25	0	+1	+1	0
7	0	0	0	-1	26	+1	+1	+1	0
8	0	+1	0	-1	27	0	-1	-1	+1
9	0	-1	+1	-1	28	0	0	-1	+1
10	0	0	+1	-1	29	+1	0	-1	+1
11	+1	0	+1	-1	30	-1	+1	-1	+1
12	-1	+1	+1	-1	31	0	-1	0	+1
13	-1	-1	-1	0	32	-1	0	0	+1
14	+1	-1	-1	0	33	0	+1	0	+1
15	0	0	-1	0	34	+1	+1	0	+1
16	0	+1	-1	0	35	-1	-1	+1	+1
17	0	-1	0	0	36	-1	-1	+1	+1
18	0	0	0	0	37	0	0	+1	+1
19	+1	0	0	0	38	0	+1	+1	+1

Таблица 3

Частотное распределение встречаемости пикселей каждого цвета для детали  $i = 19$ , шлифованной в режиме, соответствующем  $N = 7$  (см. табл. 2)

Цвет, $j = \overline{1,15}$	Количество пикселей	RGB-код	HTML-код
<b>1</b>	<b>295849</b>	<b>(0, 0, 0)</b>	<b>#000000 black</b>
2	73227	(0, 0, 128)	#000080 navy
3	3575	(0, 0, 255)	#0000FF blue
<b>4</b>	<b>1292610</b>	<b>(0, 128, 0)</b>	<b>#008000 green</b>
5	1978855	(0, 128, 128)	#008080 teal
6	22	(0, 255, 0)	#00FF00 lime
7	2230	(0, 255, 255)	#00FFFF cyan
<b>8</b>	<b>179604</b>	<b>(128, 0, 0)</b>	<b>#800000 maroon</b>
9	1578	(128, 0, 128)	#800080 purple
<b>10</b>	<b>4057406</b>	<b>(128, 128, 0)</b>	<b>#808000 olive</b>
11	31629	(128, 128, 128)	#808080 fractal
12	12235	(192, 192, 192)	#C0C0C0 silver
<b>13</b>	<b>3</b>	<b>(255, 0, 0)</b>	<b>#FF0000 red</b>
14	321	(255, 255, 0)	#FFFF00 yellow
15	19512	(255, 255, 255)	#FFFFFF white

Примечание. Коды цветов, иллюстрирующих прижоги: #000000 black; #008000 green; #800000 maroon; #808000 olive; #FF0000 red.

Изменение технологических факторов соответствовало  $D$ -оптимальному плану эксперимента (табл. 2) с количеством опытов  $N = 38$  и числом их дублирования  $n = 3$  в каждой точке плана. Применение критерия  $D$ -оптимальности подразумевает минимизацию определителя дисперсионной матрицы, что на практике снижает величину ошибки при определении коэффициентов регрессии и повышает точность регрессионных моделей [11].

После шлифования поверхность деталей обезжиривали. Съемку, ее оцифровку и конвертирование проводили по методике, описанной в работе [12]. При этом количество прижогов для каждой из деталей, шлифованных

исследуемым кругом 5NQ46I6VS3, оценивали инновационным показателем

$$\Pi_i = \left( \frac{\sum P_{j\text{пр}}}{\sum P_j} \right)_i \times 100 \%, \quad (1)$$

где  $\Pi_i$  — плотность прижогов поверхности  $i$ -й детали, %;  $\sum P_{j\text{пр}}$  — общее количество пикселей цветов прижогов при  $j = 1, 5$ ;  $\sum P_j$  — общее количество всех пикселей фотофайла после преобразования в 16-битный цветной рисунок при переменном  $j$  при тех же условиях шлифования (табл. 3).

На основе формулы (1) создана программа *PicColorPixel*, позволяющая автоматически считывать количество прижогов шлифованных поверхностей, фотофайлы которых преобразованы в 16-битный цветной рисунок (рис. 1).

Анализ поверхности детали  $i = 19$ , приведенной на рис. 1 и в табл. 3, показал, что она имеет прижоги  $\Pi = 73,289$  %. При параллельных исследованиях деталей  $i = 20$  и  $i = 21$  прижоги составили соответственно 51,929 и 62,026 %. Таким образом, средний прижог в данной точке плана равен 62,415 %.

Микротвердость шлифованных поверхностей деталей  $HV_i$  измерена на приборе ПМТ-3 по методике, описанной в работе [13]. Полу-

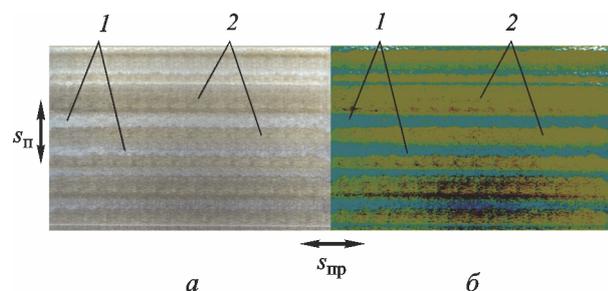


Рис. 1. Исходный (а) и представленный 16-битным цветным рисунком (б) фотофайлы поверхности обработанной детали  $i = 19$  ( $A = B = C = 0$ ;  $D = -1$ ): 1 — участки без прижогов; 2 — участки с прижогами

ченные значения позволяют оценить адекватность предлагаемой методики количественного содержания прижогов и совместно выявить физико-тепловые явления, возникающие при шлифовании деталей.

Для снижения временных затрат и углубления представлений об исследуемых явлениях использована программная среда *State-Ease Design-Expert* 8.0.4, имеющая набор инструментов для поиска и анализа регрессионных моделей, а также многопараметрической оптимизации откликов.

Первоначально программа ведет поиск моделей МДА с использованием метода наименьших квадратов (НК-оценок). При необходимости они могут быть трансформированы методом максимального правдоподобия (МП-оценок). В работе [14] показано, что метод НК-оценок основан на минимизации остаточной суммы квадратов (RSS). Выбирают такие значения параметров модели, при которых сумма квадратов разностей между опытными средними и предсказанными моделями была наименьшей. Это позволяет предсказать параметры модели с минимальной погрешностью. По результатам МДА выполняют поиск модели, в которой оставляют *i*-е значимые главные эффекты и их взаимодействия, удовлетворяющие неравенству:

$$F_i = \frac{MS_i}{MRS} > F_{0,05(f_{MS_i}, f_{MRS})}, \quad (2)$$

где  $F_i$  — наблюдаемый критерий Фишера ( $F$ -отношение) для  $i$ -го эффекта;  $MS_i$  — средняя сумма квадратов для  $i$ -го эффекта;  $MRS$  — средняя сумма квадратов остатков;  $F_{0,05(f_{MS_i}, f_{MRS})}$  — критическое  $F$ -отношение на 5%-ном уровне значимости.

Важным аспектом диагностики модели НК-оценок (т. е. степени ее адекватности) является отсутствие мультиколлинеарности, возникающей, когда две или более независимые переменные, входящие в регрессию, коррелируют между собой. При этом их коэффициенты становятся неустойчивыми к малым изменениям независимых переменных. Для проверки наличия мультиколлинеарности используют коэффициент возрастания дисперсии *VIF* (*variance inflation factors*), который должен удовлетворять неравенству

$$VIF = \left[ 1/(1 - R_i^2) \right] \leq 4, \quad (3)$$

где  $R_i^2$  — коэффициент детерминации  $i$ -го элемента регрессии.

Адекватность полученной модели НК-оценок предсказывают отношением сигнал/шум. Она адекватна, если выполняется условие

$$\left[ \frac{\max(\hat{y}) - \min(\hat{y})}{\sqrt{\bar{V}(\hat{y})}} \right] > 4. \quad (4)$$

Здесь  $\max(\hat{y})$  и  $\min(\hat{y})$  — максимальное и минимальное прогнозируемое значение отклика соответственно;  $\bar{V}(\hat{y})$  — средняя вариация предсказанных  $\hat{y}$ ,

$$\bar{V}(\hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V(\hat{y}) = pMRS^2/2,$$

где  $p$  — количество членов регрессии НК-оценок (включая аддитивную постоянную и блоки взаимодействий).

Качество полученной модели может быть проверено с помощью коэффициента детерминации  $R^2$ :

$$R^2 = 1 - \left( \frac{RSS}{RSS + ESS} \right), \quad (5)$$

где  $ESS$  — сумма квадратов остатков регрессии.

Оценка (5) является смещенной. Исправленную оценку получают следующим преобразованием:

$$(R_{ск}^2 - R_{пр}^2) < 0,2, \quad (6)$$

где  $R_{ск}^2$  и  $R_{пр}^2$  — скорректированный и прогнозируемый коэффициент детерминации соответственно.

Значимое влияние на построение регрессионной модели оказывают выбросы — атипичные наблюдения, лежащие в стороне от регрессионной зависимости для большинства других измерений. Эти данные могут исказить истинные свойства изучаемого параметра. Их наличие обусловлено ошибками, допущенными на стадии измерения, или аномальными явлениями. Они оказывают существенное влияние на угол наклона регрессионной линии и коэффициент корреляции. Выброс не принадлежит данной генеральной совокупности и поэтому не должен участвовать в поиске моделей. Анализ распределения остатков позволяет обнаружить отклонения исходных данных от нормального распределения, а также выбрать вид нормализующего преобразования. Для выявления выбросов строят зависимость прогнозируемых средних  $\hat{y}_i$  остатков. Внутренние студентизированные остатки (*internally studentized residual*) можно определить из выражения

Таблица 4

## Значимые эффекты модели НК-оценок прижогов

Источник вариации	SS	df	MS	F-отношение	Вероятность ошибки $\alpha$
Общее среднее	24001,78	7	3428,83	23,43	< 0,0001
A	11829,29	1	11829,29	80,83	< 0,0001
B	4090,2	1	4090,2	27,95	< 0,0001
D	130,01	1	130,01	0,89	0,3481
AB	1034,78	1	1034,78	7,07	0,0091
BD	620,74	1	620,74	4,24	0,0419
A <sup>2</sup>	5831,61	1	5831,61	39,85	< 0,0001
B <sup>2</sup>	1732,83	1	1732,83	11,84	0,0008
Остаточная сумма	15513,16	106	146,35		
Неадекватность	6980,88	29	240,72	2,17	0,0037
Чистая ошибка	8532,28	77	110,81	—	—
Общая сумма	39514,93	113	—	—	—

Примечание. SS, df, MS — соответственно сумма квадратов, число степеней свободы и средний квадрат значимых эффектов.

$$e_{ti} = \frac{y_i - \hat{y}_i}{\sqrt{MRS} \sqrt{1 - h_i}}, \quad (7)$$

где  $h_i$  — показатель воздействия наблюдения, или «разбалансировка».

Остатки (7) каждой модели НК-оценок должны удовлетворять закону  $t$ -распределения случайных величин, имеющих рассеяние в пределах доверительного интервала. При нарушении условий (3), (4), (6), (7) исходная модель подлежит трансформированию с пригонкой по методу МП-оценок, для чего используют степенное или логарифмическое преобразование исходной функции [14]. Как будет показано ниже, полученные модели НК-оценок не требуют трансформирования методом МП-оценок, поэтому данный метод в исследовании не представлен.

**Результаты исследования.** На первом этапе МДА была выбрана квадратичная модель, рекомендуемая программой. С помощью  $F$ -отношения были отобраны значимые на 5%-ном уровне эффекты из следующих возможных эффектов: A, B, C, D, AB, AC, AD, BC, BD, CD, A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup>, D<sup>2</sup> (табл. 4).

Как видно из табл. 4, эффект D, имеющий вероятность ошибки  $\alpha = 0,3481 > 0,05$ , незначим, но включен в модель для сохранения ее иерархии, поскольку использование неиерархической многочленной регрессионной модели

не рекомендуется. Регрессии для прижогов, предсказанные методом НК-оценок, имеют вид:

$$\hat{\Pi} = 51,21 - 14,51A + 7,56B - 1,36D - 5,43AB - 3,66BD - 14,49A^2 - 8,34B^2, \% \quad (8)$$

$$\hat{\Pi} = -32,390 + 10,322s_{pp} + 12,687s_{п} + 41,291z - 0,272s_{pp}s_{п} - 9,148s_{п}z - 0,580s_{pp}^2 - 0,521s_{п}^2, \% \quad (9)$$

Выражение (8) является моделью МДА в нормированном виде, а (9) — в натуральных величинах технологических переменных.

Аналогично предсказаны модели МДА для микротвердости:

$$\widehat{HV} = 5159,43 + 388,27A + 261,09A^2, \text{ МПа}; \quad (10)$$

$$\widehat{HV} = 5427,246 - 131,219A + 10,444A^2, \text{ МПа}. \quad (11)$$

На следующем этапе полученные модели (8)–(11) были проверены на: наличие мультиколлинеарности (3), адекватность (4), качество (6) и наличие выбросов (7). Полученные результаты приведены в табл. 5 и на рис. 2.

Из табл. 5 и рис. 2 видно, что модели (8)–(11) удовлетворяют всем необходимым требованиям. В связи с вышеизложенным их следует использовать для предсказания состояния шлифованной поверхности при различных технологических режимах шлифования и для разработки технологических рекомендаций. Преимуществом моделей (8), (10) перед (9), (11) является то, что они позволяют по

Таблица 5

Результаты проверки моделей (8)–(11)

Параметр	VIF	Адекватность	$R_{ск}^2 - R_{пр}^2$	Наличие выбросов
П	1,02...1,09	16,058	0,0376	Нет
HV	1,00	7,977	0,0105	Нет

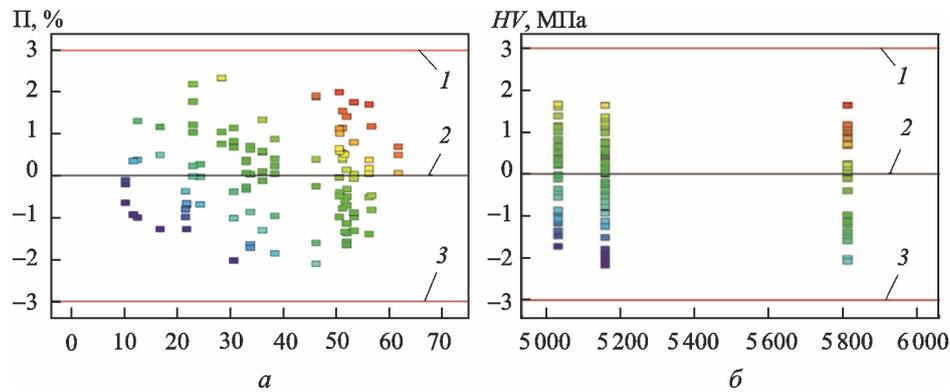


Рис. 2. Проверка моделей НК-оценок для параметра П (а) и HV (б) на рассеяние остатков: 1, 3 — доверительные интервалы; 2 — общее среднее

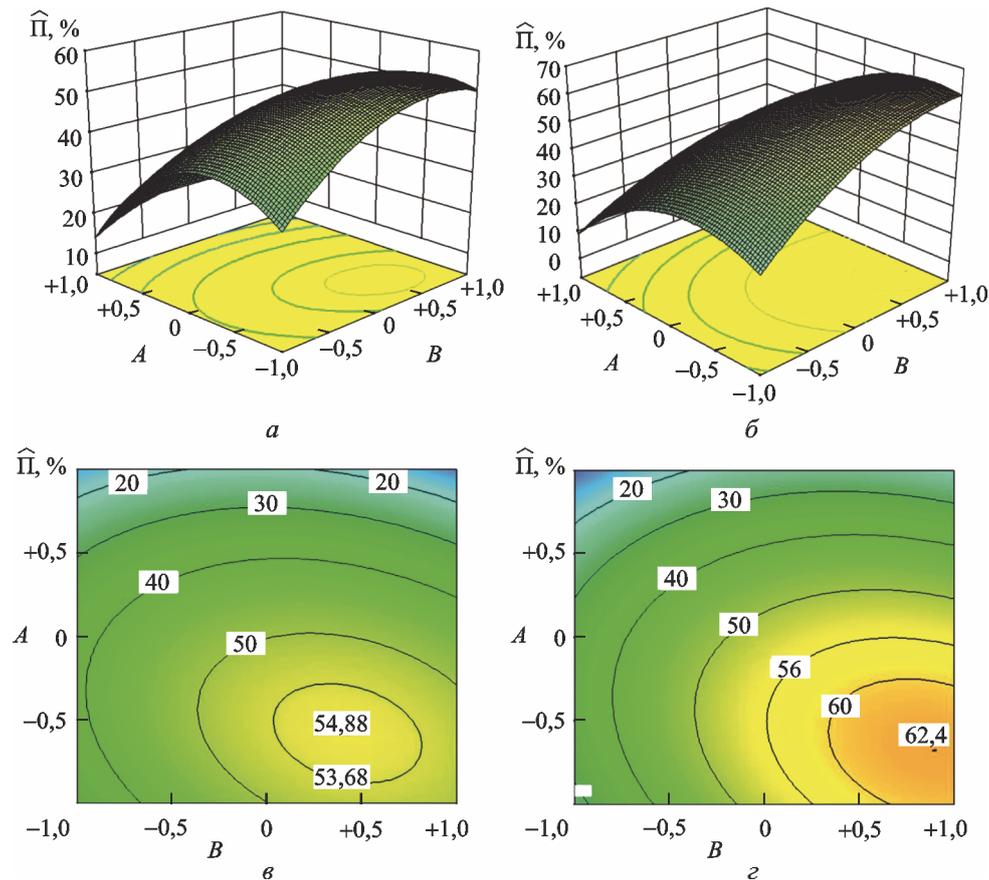


Рис. 3. Влияние продольной A и поперечной B подач на прижоги  $\hat{П}$  при черновом (а, в) и чистовом (б, г) шлифовании: а, в — C = D = +1; б, г — C = D = -1

коэффициенту регрессии оценить влияние каждого эффекта на ожидаемый отклик, а знак при коэффициенте характеризует направление его

варьирования. Из (8) видно, что наиболее значимым в модели является фактор A (продольная подача). Его возрастание в интервале

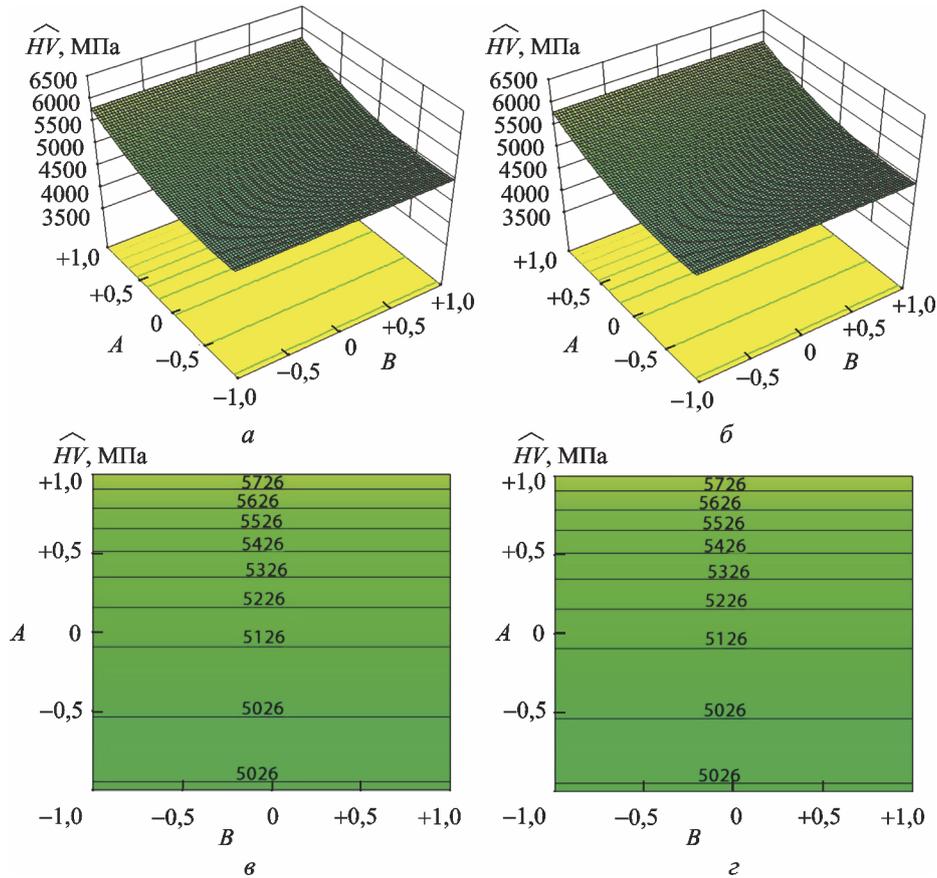


Рис. 4. Влияние продольной  $A$  и поперечной  $B$  подач на микротвердость  $\widehat{HV}$  при черновом ( $a, b$ ) и чистовом ( $b, z$ ) шлифовании:  
 $a, b$  —  $C = D = +1$ ;  $b, z$  —  $C = D = -1$

$A \in [-1; +1]$  обеспечивает снижение прижогов на 29 %. На втором месте по значимости в модели (8) находится поперечная подача, при уменьшении которой от  $B = +1$  ( $s_{\text{п}} = 10$  мм/дв. ход) до  $B = -1$  ( $s_{\text{п}} = 2$  мм/дв. ход) прогнозируется снижение прижогов на 15 %. Для точки плана  $N = 7$  модель (8) предсказала прижог  $\widehat{\Pi} = 52,57$  %, который отличается от средних измеренных ( $\bar{\Pi} = 62,415$  %) на 15,77 %. Это свидетельствует о том, что (8) можно использовать в практических целях. Модель (10) представлена одним значимым фактором  $A$  и его квадратом, т. е. по сравнению с прижогом микротвердость оказалась менее вариабельной.

Рисунки 3 и 4 иллюстрируют поверхности откликов прижогов и микротвердостей при одновременном варьировании продольной и поперечной подач на этапах шлифования: черновом ( $C = D = +1$ ) — рис. 3,  $a, b$ , рис. 4,  $a, b$ ; чистовом ( $C = D = -1$ ) — рис. 3,  $b, z$ , рис. 4,  $b, z$ . Из рис. 3,  $b, z$  видно, что наибольшие прижоги на поверхности смещены в зону наименьшей  $s_{\text{пр}}$  и наибольшей  $s_{\text{п}}$ . Установлено, что при черновом

шлифовании ( $A = -0,4; B = +0,4; C = D = +1$ ) прижоги  $\widehat{\Pi} = 54,88$  % меньше прижогов в чистовом режиме обработки, равных  $\widehat{\Pi} = 62,40$  % ( $A = -0,3, B = +0,8, C = D = -1$ ), на 13,7 %. В этой зоне отмечено снижение микротвердости до 5 021 МПа. Это подтверждает, что шлифование деталей из стали 30ХГСА кругом *Norton Quantum* происходит в условиях разупрочнения поверхностей, но без вторичной закалки.

Результаты цифрового моделирования с использованием моделей МДА однозначно подтверждают, что при шлифовании деталей из закаленной стали 30ХГСА не следует назначать продольные подачи менее  $A < +0,5$  ( $s_{\text{пр}} < 12,5$  м/мин).

На рис. 5,  $a$  и  $b$  показано влияние операционного припуска на прижоги при шлифовании деталей из стали 30ХГСА на черновом и чистовом этапах соответственно. Точки, расположенные относительно прогнозируемых средних (линия 1), получены экспериментально по трем параллельным опытам. Моделью (8) предсказано снижение прижогов при варьировании

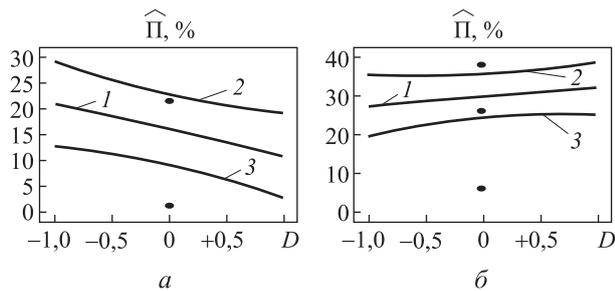


Рис. 5. Влияние операционного припуска  $D$  на прижоги  $\hat{P}$  при черновом (а) и чистовом (б) шлифовании:  
 а —  $A = B = C = +1$ ; б —  $A = B = C = -1$ ; 1 — предсказанная линия регрессии, 2, 3 — доверительные интервалы

$D \in [-1; +1]$  в черновом режиме шлифования (см. рис. 5, а), что позволяет повысить производительность процесса. При чистовом шлифовании для повышения качества поверхности припуск следует снижать до минимально допустимых величин, устраняющих дефекты предшествующей обработки.

## Выводы

1. Подтверждена высокая эффективность использования методики измерения количества прижогов с помощью цифровых технологий.

2. Построена модель МДА для предсказания прижогов, которую следует использовать для управления процессом их формирования при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 30ХГСА.

3. Увеличение прижогов, сопровождаемое снижением микротвердости поверхности, свидетельствует о том, что при шлифовании деталей доминирует тепловое разупрочнение поверхности без вторичной закалки.

4. Установлено, что для улучшения условий бесприжогового шлифования закаленных деталей целесообразно увеличить продольную подачу и снизить поперечную.

5. Определено, что большие операционные припуски позволяют не только устранить дефекты предшествующей обработки, но и снизить прижоги прошлифованных деталей.

## Литература

- [1] Северный металлоцентр. URL: <http://www.smcspsb.ru/home/7> (дата обращения 15 января 2016).
- [2] Эльянов В.Д., Куликов В.Н. *Прижоги при шлифовании*. Москва, НИИМАШ, 1974. 63 с.
- [3] Лебедев В.Г., Клименко Н.Н., Аль-Аджейлат С.А. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей. *Наукові нотатки: міжвуз. зб.*, 2013, № 40, с. 141–143.
- [4] Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Формирование прижогов отпуска при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами из КНБ. *Науково-виробничий журнал*, 2007, № 4, с. 128–150.
- [5] Ali Y.M., Zhang L.C. A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 563–571.
- [6] Euzebio C.D.G., Aguiar P.R., Miranda H.I.C., Bianchi E.C. Monitoring of grinding burn by fuzzy logic. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2012, vol. 4, pp. 637–645.
- [7] Aguiar P.R., Bianchi E.C., Canarim R.C. Monitoring of grinding burn by acoustic emission. *Acoustic Emission*, 2012, pp. 341–364.
- [8] Смирнов В.А. *Повышение эффективности плоского шлифования периферией круга за счет использования прерывистых кругов с упругодемпфирующими элементами*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2008, 20 с.
- [9] Аверков К.В., Реченко Д.С., Ласица А.М. Тепловые процессы при высокоскоростном шлифовании. *Омский научный вестник*, 2011, № 3 (103), с. 83–87.
- [10] D'yakonov A.A., Shmidt I.V. Thermal physics mathematical modeling of cycle cylindrical grinding with radial feed. *Proceeding of the world congress on engineering and computer science*, 2015, vol. 2, pp. 800–803.
- [11] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009. 824 p.
- [12] Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Нгуен В.Л. Количественная оценка прижогов при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 40Х абразивными кругами различной пористости. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2015, № 1, с. 6–19.

- [13] Солер Я.И., Лгалов В.В. Изучение микротвердости формообразующих деталей штамповой оснастки при абразивном шлифовании. *Вестник ИрГТУ*, 2012, № 7, с. 48–54.
- [14] Стрелков А.Б. *Создание информационной базы для управления процессом плоского шлифования периферией круга на основе многокритериальной оптимизации параметров обработки*. Дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2011, 190 с.

## References

- [1] *Severnyi metallotsentr* [North center]. Available at: <http://www.smcspb.ru/home/7> (accessed 15 January 2016).
- [2] El'ianov V.D., Kulikov V.N. *Prizhogi pri shlifovanii* [Burn when sanding]. Moscow, NIIMASH publ., 1974. 63 p.
- [3] Lebedev V.G., Klimenko N.N., Al'-Adzheilat S.A. Mekhanizm obrazovaniia prizhgov pri shlifovanii detalei iz zakalennykh stali [The mechanism of formation of burns in the grinding of hardened steels]. *Naukovi notatki: mizhvuz. zb.* [Scientific notes: the interuniversity collection]. 2013, no. 40, pp. 141–143.
- [4] Al'-Adzheilat S.A., Lebedev V.G. Formirovanie prizhgov otpuska pri shlifovanii napravliaiushchikh tiazhelykh pressov krugami iz KNB [The formation of burn marks leave when grinding rails heavy presses CBN]. *Naukovo-virobnichii zhurnal* [Scientific-production journal]. 2007, no. 4, pp. 128–150.
- [5] Ali Y.M., Zhang L.C. A fuzzy model for predicting burns in surface grinding of steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 563–571.
- [6] Euzebio C.D.G., Aguiar P.R., Miranda H.I.C., Bianchi E.C. Monitoring of grinding burn by fuzzy logic. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2012, vol. 4, pp. 637–645.
- [7] Aguiar P.R., Bianchi E.C., Canarim R.C. Monitoring of grinding burn by acoustic emission. *Acoustic Emission*, 2012, pp. 341–364.
- [8] Smirnov V.A. *Povyshenie effektivnosti ploskogo shlifovaniia periferiei kruga za schet ispol'zovaniia preryvistykh krugov s uprugodempfiruiushchimi elementami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing efficiency of flat grinding the periphery of a circle through the use of intermittent circles with elastic damping elements. Cand. tehn. sci. diss.]. Izhevsk, Kalashnikov ISTU publ., 2008. 20 p.
- [9] Averkov K.V., Rechenko D.S., Lasitsa A.M. Teplovy protsessy pri vysokoskorostnom shlifovanii [Thermal processes in high-speed grinding]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk scientific Bulletin]. 2011, no. 3(103), pp. 83–87.
- [10] D'yakov A.A., Shmidt I.V. Thermal physics mathematical modeling of cycle cylindrical grinding with radial feed. *Proceeding of the world congress on engineering and computer science*, 2015, vol. 2, pp. 800–803.
- [11] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009. 824 p.
- [12] Soler Ia.I., Kazimirov D.Iu., Nguen V.L. Kolichestvennaia otsenka prizhgov pri ploskom shlifovanii zakalennykh detalei iz stali 40Kh abrazivnymi krugami razlichnoi poristosti [Quantitative assessment of burns while flat grinding hardened parts made of steel 37Cr4 by abrasive wheels of different porosity]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Processing of metals (technology, equipment, tools)]. 2015, no. 1, pp. 6–19.
- [13] Soler Ia.I., Lgalov V.V. Izuchenie mикротвердости formoobrazuiushchikh detalei shtampovoi osnastki pri abrazivnom shlifovanii [The study of microhardness forming parts of die tooling for abrasive grinding]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of Irkutsk state technical University]. 2012, no. 7, pp. 48–54.
- [14] Strelkov A.B. *Sozdanie informatsionnoi bazy dlia upravleniia protsessom ploskogo shlifovaniia periferiei kruga na osnove mnogokriterial'noi optimizatsii parametrov obrabotki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Create a database to manage the process of flat grinding the periphery of the circle on the basis of multi-criteria optimization of processing parameters. Cand. tehn. sci. diss.]. Irkutsk, INRTU publ., 2011. 190 p.

## Информация об авторах

**СОЛЕР Яков Иосифович** (Иркутск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». ИрННТУ (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

**НГУЕН Ван Ле** (Иркутск) — аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». ИрННТУ (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: nhatle007@gmail.com).

**КАЗИМИРОВ Денис Юрьевич** (Иркутск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств». ИрННТУ (664074, Иркутск, Российская Федерация, ул. Лермонтова, д. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

## Information about the authors

**SOLER Yakov Iosifovich** (Irkutsk) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St, Bldg. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).

**NGUYEN Van Le** (Irkutsk) — Postgraduate, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St, Bldg. 83, e-mail: nhatle007@gmail.com).

**KAZIMIROV Denis Yurievich** (Irkutsk) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment for Mechanical Manufacturing. Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Russian Federation, Lermontov St, Bldg. 83, e-mail: solera@istu.irk.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография  
**М.М. Жилейкина**

### «Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики»

Управляемость и устойчивость автомобиля являются важнейшими эксплуатационными свойствами и составляющими активной безопасности движения, оценке которых придается большое значение. Представлены результаты теоретических исследований, выполненных на кафедре «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Разработаны принципы повышения показателей устойчивости и управляемости как двухосных, так и многоосных колесных машин, оснащенных различными типами трансмиссий. Обоснованы принципиальные решения по способам управления движением машин, обеспечивающих повышение их курсовой и траекторной устойчивости. Предложены критерии оценки эффективности работы комплексной системы динамической стабилизации движения колесных машин. Разработаны алгоритмы работы системы динамической стабилизации с применением методов нечеткой логики для двухосных и многоосных колесных машин.

Для аспирантов и докторантов, обучающихся по научной специальности 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины», а также для научных работников, занимающихся научными исследованиями в области теории движения колесных машин.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru