

УДК 621.923

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАЛИПАНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ НА АБРАЗИВНЫЕ ЗЕРНА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗАГОТОВОК ИЗ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2020 С.В. Пашук<sup>1</sup>, А.Н. Унянин<sup>2</sup>, А.В. Хазов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет

<sup>3</sup> АО «Ульяновский механический завод»

Статья поступила в редакцию 12.05.2020

Исследования выполнены с целью выявления связи интенсивности налипания частиц материала заготовки на абразивные зерна (АЗ) шлифовального круга с физико-механическими свойствами зерен. Получена математическая зависимость для расчета напряжения на площадке контакта налипа с АЗ после выхода АЗ из контакта с заготовкой. Выполнено численное моделирование локальных температур при микрорезании (царапании) образцов из стали 3Х3М3Ф абразивными зернами из различных материалов. Рассчитаны деформация налипа и напряжения, являющиеся следствием этой деформации, действующие на соединение налипа с зернами из материалов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения. Установлено, что с увеличением разности коэффициентов линейного расширения материалов заготовки и АЗ увеличиваются напряжения, способствующие отрыву налипа от поверхности АЗ. Это позволяет прогнозировать меньшую интенсивность налипания материала заготовки на АЗ из таких материалов. В процессе экспериментальных исследований осуществляли микрорезание образцов единичными абразивными зернами. Установлено, что в меньшей степени изнашиваются и засаливаются АЗ из эльбора. Эльбор имеет максимальное значение коэффициента теплопроводности среди испытанных материалов и в меньшей степени изнашивается, поэтому локальные температуры при микрорезании зернами из эльбора минимальные. Разность коэффициентов линейного расширения материала налипа и эльбора имеет максимальное значение. Поэтому на площадке контакта АЗ из эльбора с налипом возникают напряжения, способствующие отрыву налипа от этой поверхности. В результате выполнено ранжирование АЗ из различных материалов по критериям, характеризующим их износ и засаливание. Подтверждена выявленная аналитическим путем взаимосвязь интенсивности засаливания зерна с коэффициентами линейного расширения и теплофизическими характеристиками материалов АЗ.

*Ключевые слова:* шлифование, абразивное зерно, пластичный материал, температура, коэффициент линейного расширения, налипание, засаливание

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-132-138

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 19-48-730002*

### ВВЕДЕНИЕ

Режущая способность шлифовального круга снижается с увеличением наработки вследствие затупления и засаливания его рабочей поверхности. При шлифовании заготовок из пластичных и адгезионно-активных материалов потеря режущей способности связана, главным образом, с засаливанием, первопричиной которого в большинстве случаев является налипание частиц материала заготовки на абразивные зерна

(АЗ). Установлено, что потеря кругом режущей способности вследствие засаливания интенсифицируется с увеличением пластичности материала обрабатываемой заготовки [1 – 4]. Для разработки рекомендаций, направленных на снижение интенсивности налипания, необходимо выявить связь интенсивности этого процесса с физико-механическими свойствами АЗ.

Установлено аналитически и подтверждено экспериментально [5], что налипание интенсифицируется с увеличением локальной температуры в зонах, прилегающих к зерну, а последняя зависит от теплофизических характеристик материала АЗ [6, 7].

Налипы удерживаются на поверхности зерна за счет механических и адгезионных сил, причем наиболее прочно – во впадине субмикропрофиля АЗ [4]. После выхода АЗ из контакта с заготовкой в объемах налипа и АЗ появля-

*Пашук Сергей Владимирович, начальник производственного отдела «Центр производства и инжиниринга» СамГТУ.*

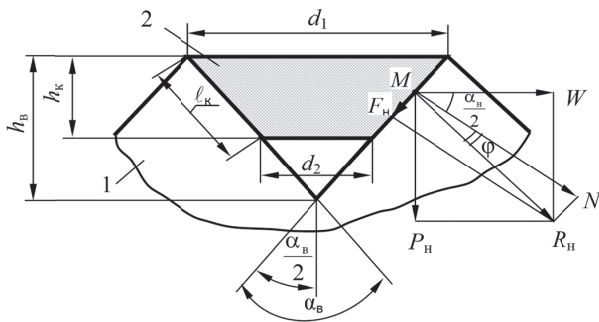
*Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». E-mail: a\_un@mail.ru*

*Хазов Александр Васильевич, главный инженер. E-mail: umz\_73@mail.ru*

ются напряжения, являющиеся следствием их остывания. Нижеприведенные исследования выполнены с целью оценки этих напряжений и выявления условий, влияющие на прочность соединения налива с АЗ.

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Наиболее вероятно, что разрушение (срез) образовавшегося мостика схватывания материала заготовки с АЗ произойдет на уровне вершин субмикروпрофиля АЗ, поскольку допускаемые напряжения на срез материала налива (заготовки) уменьшаются с увеличением температуры, а последняя выше в поверхностных слоях заготовки и АЗ [4]. Исходя из принятой формы микровпадины на АЗ [4] и расчетов, свидетельствующих, что глубина  $h_k$  внедрения материала заготовки во впадины на поверхности АЗ может быть меньше максимальной высоты микронеровностей  $h_b$ , налип во впадине представили в виде усеченного конуса (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема к расчету напряжений в налипе, находящемся во впадине субмикропрофиля АЗ: 1 – АЗ, 2 – налип

После разрушения мостика схватывания прекращает действовать внешнее давление, вызвавшее деформацию материала налива, а остаточные деформации в объеме последнего порождают силы, действующие со стороны налива на поверхность впадины субмикропрофиля зерна. На рис. 1 все силы условно приложены к одной точке, расположенной на поверхности контакта налива и АЗ.

Для расчета упругой деформации налива (в направлении силы  $W$ ), находящегося во впадине субмикропрофиля АЗ при локальной температуре, возникающей в процессе шлифования, получена зависимость:

$$\Delta l_n = \frac{(d_1 + d_2) \cdot \sigma_{ПТН}}{2E_{T_n}}, \quad (1)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры усеченного конуса, в виде которого представлен налип во впадине, м;  $\sigma_{ПТН}$  – наибольшие напряжения в материале налива, до которых справедлив закон Гука, при

температуре  $T_n$  (при которой произошло образование налива на АЗ), Па;  $2E_{T_n}$  – модуль упругости материала налива при температуре  $T_n$ , Па.

Деформация налива в процессе остывания последнего вместе с зерном до температуры  $T$  изменится на величину, равную

$$\Delta l_{1T} = (\alpha_n - \alpha_{a.з.}) \cdot (T_n - T) \cdot \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (2)$$

где  $T_n$  – локальная температура, при которой произошло адгезионное взаимодействие налива с зерном, К;  $T$  – температура, до которой остывают АЗ и налип, К;  $\alpha_n$  и  $\alpha_{a.з.}$  – коэффициенты линейного расширения материала соответственно налива и АЗ в диапазоне температуры  $T \dots T_n$ ,  $K^{-1}$ .

После остывания налива до температуры  $T$  напряжения на площадке контакта налива с АЗ составят

$$\sigma_{HT} = \frac{2 \cdot E_T (\Delta l_n - \Delta l_{1T}) \cdot \cos^2 \frac{\alpha_b}{2}}{d_1 + d_2}, \quad (3)$$

где  $E_T$  – модуль упругости материала налива при температуре  $T$ , Па;  $\alpha_b$  – угол при вершине микровпадины, град. (см. рис. 1).

Если  $\Delta l_{1T} < \Delta l_n$ , т. е.  $\Delta l_{1T} > 0$ , то после остывания на площадке контакта налива с АЗ будут действовать сжимающие напряжения. Когда  $\Delta l_{1T} > \Delta l_n$ , т. е.  $\Delta l_{1T} < 0$ , температурная деформация налива в процессе остывания превысит начальную деформацию и сжатие налива сменится растяжением, а на площадке контакта налива с АЗ появятся напряжения  $\sigma_{HT}$ , способствующие отрыву налива от этой поверхности. В этом случае вероятность отрыва налива от поверхности АЗ будет выше. Параметр  $\Delta l_{1T}$  зависит от значений коэффициентов линейного расширения материалов налива и АЗ и увеличивается с увеличением их разности. Из зависимостей (1) – (3) следует, что для получения растягивающих напряжений  $\sigma_{HT}$  следует использовать АЗ из материалов, коэффициенты линейного расширения которых значительно отличаются от соответствующих коэффициентов материала заготовки. Величина напряжений  $\sigma_{HT}$  зависит также от локальной температуры  $T_n$ , при которой произошло образование налива.

Локальные температуры в процессе царапания образца зернами рассчитывали, используя методику и программное обеспечение, приведенные в работах [4, 5]. Эта методика учитывает наличие источников тепловыделения в зоне деформирования и в зонах контакта стружки с АЗ (для АЗ, осуществляющих микрорезание) и АЗ с образцом (заготовкой), зависимости теплофизических свойств материалов объектов от температуры, относительное перемещение объектов (АЗ относительно образца и стружки относительно АЗ). Тепловые процессы модели-

ровали на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности с общими граничными условиями в зоне контакта объектов. Силы микрорезания и мощности источников тепловыделения рассчитывали по полученным аналитическим путем зависимостям [5, 8].

Численное моделирование локальных температур и последующие экспериментальные исследования выполняли для АЗ из нормального электрокорунда (материал № 1), циркониевых электрокорундов: материал № 2 изготовлен в Австрии ( $ZrO_2 - 40\%, Al_2O_3 - 60\%$ ), материал № 3 – в ОАО «УралНИИАШ» ( $ZrO_2 - 39,6\%, Al_2O_3 - 59,4\%, C - 0,49\%$ ), материал № 4 также изготовлен в ОАО «УралНИИАШ» ( $ZrO_2 - 42,6\%, Al_2O_3 - 56,5\%, C - 0,48\%$ ), а также из эльбора ЛКВ 50 (матери-

ал № 5). Эти материалы имеют различные теплофизические характеристики (коэффициент теплопроводности, удельную теплоемкость и плотность), а также коэффициент трения в зоне контакта с образцом. В качестве материала образцов использовали теплостойкую штамповую сталь 3Х3М3Ф, обладающую достаточно высокими пластическими свойствами и вязкостью.

В процессе моделирования локальных температур варьировали максимальной глубиной внедрения АЗ в материал образца  $a_z$ , принимая ее равной 3 и 6 мкм, и размером площадки затупления  $\ell_2$  на АЗ – 20 и 100 мкм. В процессе шлифования площадка размером 20 мкм образуется на АЗ после правки круга; после нескольких десятков минут размер площадки достигает 100 мкм [8].

**Таблица 1.** Результаты численного моделирования локальных температур на площадке контакта АЗ с образцом и напряжений  $\sigma_{нт}$  в налипе

Номер материала АЗ	Глубина внедрения АЗ в материал образца $a_z$ , мкм	Размер площадки затупления на АЗ $\ell_2$ , мкм	Средняя локальная температура, К	Напряжения $\sigma_{нт}$ , МПа
1	3	20	710	380
		100	1220	-
	6	20	1250	60
		100	2200	-
2	3	20	750	150
		100	1300	-
	6	20	1340	-530
		100	2330	-
3	3	20	790	110
		100	1310	-
	6	20	1380	-580
		100	2350	-
4	3	20	790	90
		100	1320	-
	6	20	1380	-585
		100	2400	-
5	3	20	670	-60
		100	1100	-
	6	20	1150	-650
		100	2050	-

Максимальные значения локальных температур зафиксированы при царапании образца зернами из материала № 4, имеющего минимальное значение теплопроводности, минимальные – при царапании АЗ из эльбора (материал № 5), имеющего максимальный коэффициент теплопроводности [9, 10] и минимальный коэффициент трения по стали (табл. 1). Малые значения локальных температур получены также при царапании зернами из электрокорунда нормального, теплопроводность которого выше, чем циркониевых электрокорундов. Температура от зерен, осуществляющих микрорезание ( $a_z = 6$  мкм), в среднем на 70 – 80 % выше, чем от зерен, осуществляющих пластическое деформирование материала образца ( $a_z = 3$  мкм). Увеличение размера  $l_2$  площадки затупления на зерне с 20 до 100 мкм привело к увеличению локальных температур в среднем на 75 %.

По зависимостям (1) – (3) рассчитали деформацию налива и напряжения, являющиеся

следствием этой деформации, и действующие на соединение налива из стали 3Х3М3Ф ( $\alpha_n = 12,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) с зернами из АЗ, имеющих различные коэффициенты линейного расширения  $\alpha_{a,3}$  (табл. 2). Максимальное значение коэффициента линейного расширения, наиболее близкое к коэффициенту материала налива, имеет электрокорунд [9], поэтому выполняется условие  $\Delta l_{1T} < \Delta l_n$ , а на площадке контакта налива с АЗ из электрокорунда будут действовать сжимающие напряжения (см. табл. 1). Величина этих напряжений значительно ниже, чем предел прочности материала налива (для стали 3Х3М3Ф  $\sigma_b = 1500$  МПа), поэтому вероятность разрушения налива мала. Максимальную разницу с коэффициентом линейного расширения налива имеет соответствующий коэффициент эльбора. На площадке контакта налива с АЗ из эльбора возникают напряжения  $\sigma_{нт}$ , способствующие отрыву налива от поверхности АЗ. Поэтому можно прогнозировать менее интен-

Таблица 2. Коэффициенты линейного расширения абразивных материалов [9]

Абразивный материал	Электрокорунд	Циркониевый электрокорунд	Кубический нитрид бора
Коэффициент линейного расширения $\alpha_{a,3}, K^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$(2,1 \dots 4,0) \cdot 10^{-6}$

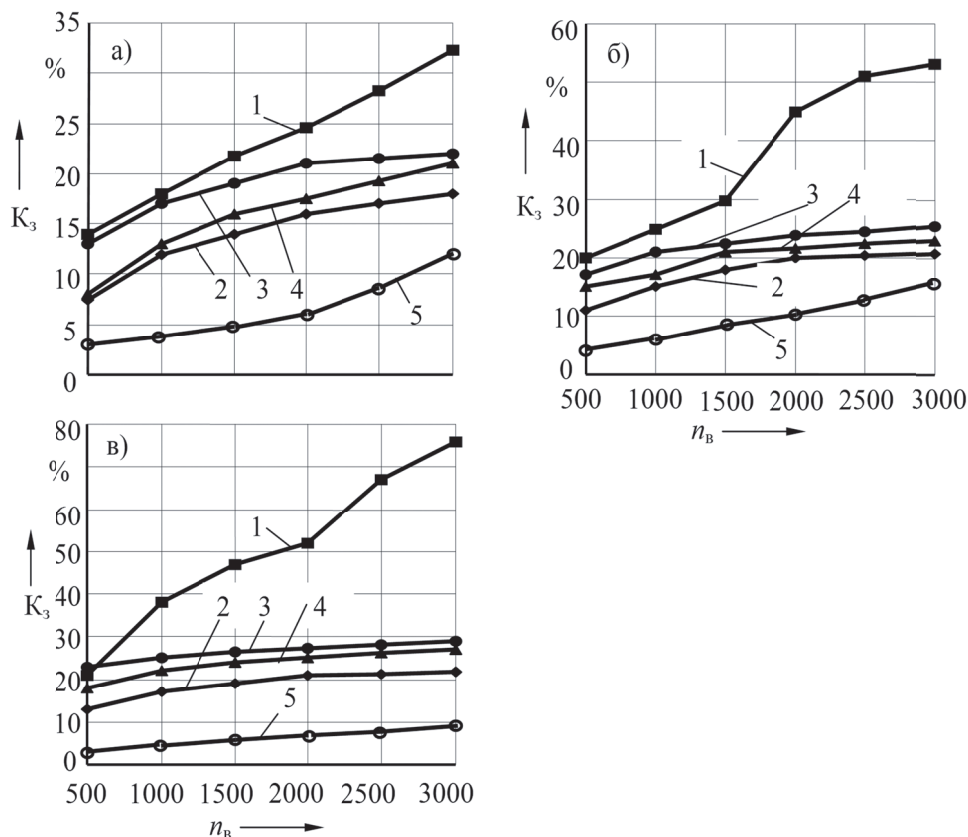
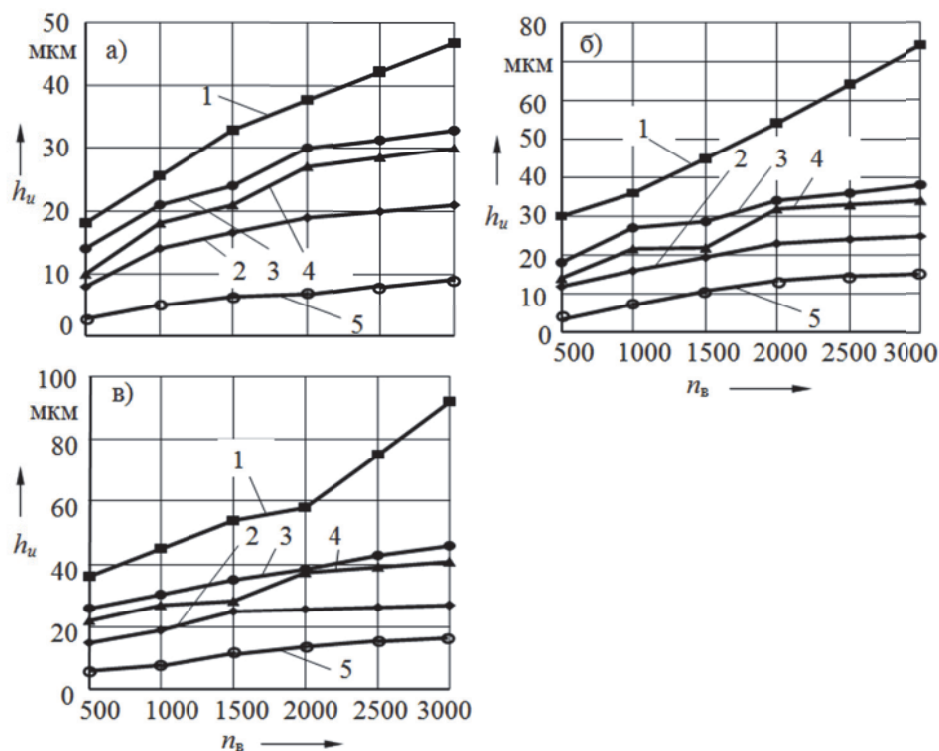


Рис. 2. Зависимость коэффициента засаливания зерна  $K_3$  от числа взаимодействий  $n_b$  АЗ с образцом: а –  $a_z = 3$  мкм; б –  $a_z = 6$  мкм; в –  $a_z = 8$  мкм; 1, 2, 3, 4, 5 – АЗ из материала № 1, 2, 3, 4, 5 соответственно



**Рис. 3.** Зависимость износа зерна  $h_u$  от числа взаимодействий  $n_B$  АЗ с образцом: а –  $a_z = 3$  мкм; б –  $a_z = 6$  мкм; в –  $a_z = 8$  мкм; 1, 2, 3, 4, 5 – АЗ из материала № 1, 2, 3, 4, 5 соответственно

сивное налипание частиц материала заготовки на АЗ из эльбора в сравнении с зёрнами из других материалов. Коэффициенты линейного расширения циркониевых электрокорундов, как и значения напряжений для этих абразивных материалов, занимают промежуточное положение между испытанными материалами № 1 и № 5. Таким образом, интенсивность засаливания АЗ должна уменьшиться с увеличением разности коэффициентов линейного расширения материалов заготовки и АЗ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе экспериментальных исследований на шпиндель станка устанавливали планшайбу с держателем (индентором), в котором закрепляли (запаивали) АЗ. Зерно затачивали на конус с углом  $\gamma = 120^\circ$  алмазным кругом. Контролировали следующие параметры: площадь налипов металла образца на АЗ  $F_{\text{н}}$ , м<sup>2</sup>; коэффициент засаливания АЗ  $K_3$ , равный отношению площади налипа  $F_{\text{н}}$  к площади площадки износа на АЗ, м<sup>2</sup>; линейный износ АЗ  $h_u$ , м. Площадь  $F_{\text{н}}$ , количество налипов и размеры площадки износа на АЗ определяли с помощью микроскопа РМЕ. Глубиной внедрения зерна в образец  $a_z$  варьировали в пределах 3 ... 8 мкм. При  $a_z = 3$  мкм АЗ осуществляет пластическое деформирование материала образца, при больших глубинах – микрорезание [11].

Максимальные значения  $K_3$  и  $h_u$  получены при царапании образцов зёрнами из электрокорунда нормального (материал № 1), имеющего среди испытанных абразивных материалов минимальную твердость и теплоустойчивость (рис. 2, 3). Коэффициент засаливания и износ АЗ из циркониевых электрокорундов значительно меньше. Из циркониевых электрокорундов минимальные значения  $K_3$  и  $h_u$  получены при микрорезании АЗ из материала № 2: в сравнении с электрокорундом нормальным  $K_3$  и  $h_u$  оказались меньше на 60 и 110 % соответственно. АЗ из эльбора изнашиваются и засаливаются в меньшей степени, чем зёрна из других исследованных материалов. Локальная температура на площадке контакта АЗ с образцом (заготовкой) снижается с увеличением коэффициента теплопроводности материала зерна и увеличивается с увеличением площадки затупления [5]. Эльбор имеет максимальное значение коэффициента теплопроводности среди испытанных материалов и в меньшей степени изнашивается. Это является другой причиной менее интенсивного налипания металла на АЗ из эльбора.

Значения коэффициента засаливания коррелируются с напряжениями  $\sigma_{\text{нт}}$  в налипе. Материал АЗ № 1 (электрокорунд нормальный), для которого зафиксировано максимальное значение  $K_3$ , обеспечивает среди испытанных материалов и максимальные значения сжимающих напряжений. Материал № 5 (эльбор), на площадке контакта которого с налипом возникают

напряжения  $\sigma_{нт}$ , способствующие отрыву налпа от этой поверхности, имеет минимальное значение  $K_3$ . Коэффициенты засаливания АЗ из циркониевых электрокорундов (материалы № 2 – 4), как и значения напряжений, занимают промежуточное положение между АЗ из эльбора и электрокорунда нормального.

Между зафиксированными значениями  $K_3$  и  $h_{и}$  существует корреляция: чем больше  $h_{и}$ , тем больше  $K_3$ . Одной из причин увеличения  $K_3$  с увеличением износа по мере увеличения числа взаимодействий зерна с заготовкой является повышение локальных температур с увеличением площадки затупления на АЗ. В то же время с увеличением  $K_3$  интенсифицируется процесс адгезионного изнашивания зерен.

Перспективным направлением повышения эффективности процесса шлифования, в том числе снижения температуры, является использование энергии ультразвуковых колебаний [12]. Установлено, что при наложении ультразвуковых колебаний температура заготовки снижается на 10 %, а локальные температуры в зоне контакта абразивного зерна с заготовкой и со стружкой – до 30 %.

### ВЫВОДЫ

1. Установлено, что с увеличением разности коэффициентов линейного расширения материалов заготовки и абразивного зерна увеличиваются напряжения, способствующие отрыву налпа от поверхности зерна, что позволяет прогнозировать меньшую интенсивность адгезионного взаимодействия зерна с заготовкой.

2. Экспериментальным путем установлено, что в меньшей степени изнашиваются и засаливаются зерна из эльбора, имеющего максимальное значение коэффициента теплопроводности и максимальную разность коэффициентов линейного расширения с материалом налпа.

3. Выполнено ранжирование абразивных зерен из различных материалов по критериям, характеризующим их износ и засаливание. Подтверждена выявленная аналитическим путем взаимосвязь интенсивности засаливания зерна с коэффициентами линейного расширения и теплофизическими характеристиками его материала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саютин, Г.И., Носенко В.А. Шлифование деталей и сплавов на основе титана. – М.: Машиностроение, 1987. – 80 с.
2. Силин, С.С., Хрульков В.А., Лобанов А.В., Рыкунов

Н.С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.

3. Nagaraj Anil P., Ghattopadhyay A. K. On some aspects of wheel loading // Wear. – 1989. – 135. – № 1. – PP. 41 – 52.
4. Худобин, Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.
5. Худобин, Л.В., Унянин А.Н. Влияние локальных температур на налипание материала заготовки на абразивные зерна // СТИН. – 2008. – № 6. – С. 26 – 31.
6. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Модели шлифования. Теории и эксперимент. – М.: ФГУП Издательство «Известия», 2018. – 312 с.
7. Abhang L. B, Nameedullah M. Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process, International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2 (4), 2010, pp. 382 – 393.
8. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
9. Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. – 238 с.
10. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
11. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Исследование процесса микрорезания заготовок из пластичных материалов единичным абразивным зерном // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник трудов МНТК «Шлифабразив – 2002». – Волжский: ВолжскИСИ, 2002. – С. 108 – 111.
12. Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field // MATEC Web of Conferences. – Vol. 129. – 2017.

**THE STUDY OF THE PROCESS OF STICKING PARTICLES  
OF THE WORKPIECE MATERIAL ON THE ABRASIVE GRAIN  
DURING THE GRINDING OF WORKPIECES MADE OF PLASTIC MATERIALS**

© 2020 S.V. Pashuk<sup>1</sup>, A.N. Unyanin<sup>2</sup>, A.V. Khazov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University

<sup>2</sup> Ulyanovsk State Technical University

<sup>3</sup> AO «Ulyanovsk Mechanical Plant»

Studies were carried out to identify the relationship between the intensity of adhesion of the workpiece material particles on abrasive grains (AZ) of the grinding wheel with the physical and mechanical properties of the grains. The mathematical dependence for the calculation of the voltage at the contact area of the chip with AZ after the AU out of contact with the workpiece is obtained. Numerical simulation of local temperature when microreserve (scratching) samples of steel 3KH3M3F abrasive grains of various materials. The deformation of the adhesion and the stresses resulting from this deformation acting on the connection of the adhesion with grains from materials having different coefficients of linear expansion are calculated. It is established that with the increase of the difference of coefficients of linear expansion of the workpiece materials and AZ, the stresses contributing to the separation of the adhesion from the AZ surface increase. This makes it possible to predict a lower intensity of sticking of the workpiece material on the AZ of such materials. In the course of experimental studies, micro-cutting of samples by single abrasive grains was carried out. It was found that to a lesser extent wear out and salted AZ from elbor. Elbor has the maximum value of the coefficient of thermal conductivity among the tested materials and to a lesser extent wears out, so the local temperatures when cutting grains from Elbor are minimal. The difference between the coefficients of linear expansion of the material adhesion and elbor has a maximum value. Therefore, the contact area of AZ CBN with adhesion there is tension, contributing to the separation adhesion from this surface. As a result, AZ was ranked from various materials according to the criteria characterizing their wear and salting. Confirmed identified analytically the relationship between the intensity of brining of grain with a coefficient of linear expansion and thermal characteristics of the materials AZ.

*Keywords:* grinding, abrasive grain, plastic material, temperature, coefficient of linear expansion, sticking, salting.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-132-138

---

*Sergey Pashuk, Head of Production Department «Center for Production and Engineering» SamGTU*

*Alexandr Unyanin, Doctor of Technics, Professor of the Department «Engineering Technology». E-mail: a\_un@mail.ru*

*Alexandr Khazov, Chief Engineer. E-mail: umz73@mail.ru*