

Повышение режущей способности шлифовального круга при обработке заготовок из пластичных сталей наложением ультразвуковых колебаний на заготовку

© 2021

Хазов Александр Васильевич¹, главный инженер
Унянин Александр Николаевич^{*2,3}, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технология машиностроения»

¹АО «Ульяновский механический завод», Ульяновск (Россия)

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

*E-mail: a_un@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

Аннотация: Целью исследования стало выявление связи интенсивности налипания с ультразвуковыми колебаниями (УЗК), используемыми в процессе обработки, и оценка работоспособности кругов при шлифовании заготовок из пластичных материалов. Выполнено численное моделирование локальных температур и температуры заготовки из стали 3Х3М3Ф в процессе шлифования с наложением УЗК. Установлено, что применение УЗК амплитудой 3 мкм приводит к снижению локальных температур на 13...40 %, температур заготовки – до 20 %. Расчетом установлено, что наложение УЗК амплитудой 3 мкм способствует снижению коэффициента засаливания на 33 % для режущего и на 7 % для пластически деформирующего зерна. При увеличении скорости продольной подачи или глубины шлифования коэффициент засаливания при использовании УЗК увеличивается в меньшей степени, чем в случае, когда колебания не накладываются. Выполнено численное моделирование локальных температур при царапании образцов из стали 3Х3М3Ф единичными абразивными зёрнами с наложением УЗК. Рассчитана деформация налипа, а также напряжения, являющиеся следствием этой деформации, действующие на соединение налипа с зёрнами без наложения и с наложением УЗК. В процессе экспериментальных исследований осуществляли микрорезание образцов единичными абразивными зёрнами. Установлено, что в меньшей степени изнашиваются и засаливаются абразивные зёрна при микрорезании с наложением на заготовку УЗК. Снижение коэффициента засаливания при наложении УЗК является следствием снижения интенсивности налипания частиц материала заготовки на абразивные зёрна за счет схватывания. Рассмотрена возможность повышения эффективности плоского шлифования за счет использования энергии УЗК, накладываемых на заготовку в направлении, совпадающем с осью шлифовального круга. Заготовка закрепляется в устройстве между излучателем колебаний и опорой, т. е. является одним из звеньев колебательной системы. Экспериментальные исследования выполнили при шлифовании периферией круга заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т. При шлифовании с УЗК коэффициент шлифования увеличивается до 70 %, а период стойкости круга – в 2...3 раза.

Ключевые слова: шлифование; ультразвуковые колебания; УЗК; абразивное зерно; заготовка; налипание; засаливание; пластичный материал; 3Х3М3Ф; 12Х18Н10Т.

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 19-48-730002.

Для цитирования: Хазов А.В., Унянин А.Н. Повышение режущей способности шлифовального круга при обработке заготовок из пластичных сталей наложением ультразвуковых колебаний на заготовку // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 55–62. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-55-62.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении операций окончательного и тонкого шлифования, когда круг работает в режиме затупления или частичного самозатачивания, с увеличением наработки режущая способность круга снижается. Причинами являются образование на абразивных зёрнах площадок изнашивания (затупление абразивных зёрен) и засаливание рабочей поверхности круга. Засаливание связано с появлением на рабочей поверхности круга частиц шлама, состоящего из материалов зёрен и связки шлифовального круга и материала обрабатываемой заготовки.

В большинстве случаев режущая способность в процессе шлифования снижается не вследствие проникновения частиц шлама в пространство между зёрнами

и в поры круга, а вследствие налипания на абразивные зёрна материала (металла) обрабатываемой заготовки [1].

На процесс образования соединения керамического материала с металлами влияет ряд факторов, прежде всего давление и температура в зоне контакта соединяемых поверхностей и продолжительность контакта [2]. Давление в зоне контакта режущих и пластически деформирующих зёрен с заготовкой, локальные (мгновенные) температуры и время действия этих факторов для большей части условий и режимов шлифования достаточны для образования налипа на зерне за счет схватывания [1]. Установлено, что если температура в зоне контакта не превышает $(0,80...0,85) \cdot T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления соединяемого металла, то процесс образования соединения металлического и керамического объектов не происходит. Температура

плавления большинства сталей равна около 1400 °С, а локальные (мгновенные) температуры при наиболее часто используемых на практике условиях и режимах шлифования превышают это значение [1; 3]. Поэтому изыскание путей и средств уменьшения локальных температур актуально для снижения интенсивности засаливания круга.

Для расчета коэффициента трения абразивного зерна, покрытого налипками, о поверхность обрабатываемой заготовки предложена зависимость [1], аргументами которой являются коэффициенты трения налипки и абразивного зерна по поверхности заготовки и коэффициент засаливания зерна. Коэффициент трения абразивного зерна по металлу значительно ниже коэффициента трения в зоне контакта металлических поверхностей, поэтому при шлифовании кругами с налипками на поверхностях абразивных зерен коэффициент трения в зоне контакта зерна с заготовкой увеличивается. Шлам, находящийся в пространстве между зернами круга и в его порах, также способствует увеличению коэффициента трения и силы трения в зоне контакта «шлифовальный круг – заготовка». Увеличение коэффициента трения при обработке засаленными кругами приводит к увеличению силы шлифования, а следовательно, и к росту температуры в зоне шлифования. В результате снижается качество деталей: в их поверхностном слое происходят нежелательные структурные и фазовые превращения, увеличивается вероятность появления прижогов и микротрещин, возникают значительные растягивающие напряжения [4; 5].

Адгезионное взаимодействие материала заготовки с налипками в процессе шлифования является причиной развития усталостных трещин в абразивных зернах, в результате чего интенсифицируется процесс адгезионного изнашивания зерен [6; 7]. При увеличении площадки износа на зерне увеличиваются и локальные температуры, что приводит к интенсификации процесса образования наливов.

Одним из путей снижения степени засаливания рабочей поверхности круга является выбор материалов зерна и связки круга, в меньшей степени предрасположенных к образованию соединения с материалом заготовки за счет схватывания. Другим направлением является рациональное применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), способствующее интенсификации их смазочного и моющего действий [8; 9]. При образовании на поверхностях заготовки и абразивных зерен экранирующих пленок вследствие реализации смазочного действия СОТС предотвращается непосредственный контакт этих поверхностей, что затрудняет процесс схватывания контактирующих поверхностей зерна и заготовки.

Для восстановления режущей способности кругов используют пути и средства, направленные на удаление частиц шлама с их рабочих поверхностей.

Интенсифицировать смазочное и моющее действия смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при шлифовании возможно за счет применения струйно-напорно-внезонного способа подачи СОЖ, подачи СОЖ к торцу круга через клиновые насадки с наложением на них ультразвуковых колебаний (УЗК) и ультразвуковой очистки рабочей поверхности круга [10; 11].

Непрерывная правка шлифовального круга обеспечивает стабильную режущую способность его рабочей поверхности. Этот способ правки кругов широко используется на операциях глубинного шлифования заготовок из труднообрабатываемых материалов [11; 12], в том числе при многокоординатном глубинном шлифовании [13].

Одним из средств снижения локальной температуры, оказывающей доминирующее влияние на образование соединения материалов заготовки и абразивного зерна с образованием наливов, является наложение УЗК на заготовку [14; 15]. Однако влияние УЗК на процесс налипания материала заготовки на абразивные зерна не выявлено.

Цель исследования – установление влияния ультразвуковых колебаний, накладываемых на обрабатываемую заготовку в процессе шлифования, на процесс налипания частиц материала заготовки на абразивные зерна и оценка работоспособности кругов при шлифовании заготовок из пластичных материалов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для расчета коэффициента засаливания зерна, представляющего отношение площади наливов металлу к площади площадки износа на зерне, использовали регрессионные модели, полученные в работе [1]. Аргументами этих моделей являются локальные температуры в зоне контакта абразивного зерна с заготовкой.

Расчет температурного поля с наложением колебаний на заготовку выполнен для схемы плоского маятникового шлифования периферией круга заготовок из конструкционной легированной стали 3Х3М3Ф, обладающей высокими пластическими свойствами (относительным удлинением и относительным сужением образцов из этой стали) и вязкостью [16]. В качестве материала абразивного зерна шлифовального круга применили электрокорунд белый зернистостью F100. Использовали следующие элементы режима шлифования: рабочая скорость круга $V_k=35$ м/с; глубина шлифования $t=0,01$ мм; скорость продольной подачи $V_{sm}=10$ м/мин. Высокие пластические свойства и вязкость стали 3Х3М3Ф обуславливают интенсивное образование наливов на зернах круга при шлифовании заготовок из этой стали [1; 7]. Для расчета сил диспергирования материала заготовки режущими и пластически деформирующими абразивными зернами и мощности источников тепловыделения (принимали во внимание три источника) использовали аналитические зависимости [17; 18]. Теплофизические характеристики абразивных материалов приведены в работе [19]; теплофизические и механические характеристики стали 3Х3М3Ф приведены в справочнике [16].

Для численного моделирования температурного поля процесса шлифования с УЗК использовали программное обеспечение, представленное в работе [20]. Моделировали наложение на заготовку колебаний частотой 22000 Гц. Амплитуда колебаний заготовки в направлении, перпендикулярном ее обрабатываемой поверхности, составляла 3 мкм. Фиксировали температуру заготовки на различных расстояниях от ее обрабатываемой поверхности и локальные (мгновенные) температуры

в зонах контакта режущих зерен с заготовкой и со стружкой и в зонах контакта пластически деформирующих зерен с заготовкой. Локальные температуры определяли в нескольких точках, расположенных в зонах контакта зерна с заготовкой и со стружкой на различных расстояниях от вершины зерна, а затем рассчитывали среднее значение температур.

Для расчета напряжений, способствующих отрыву налипа от поверхности абразивного зерна, использовали аналитические зависимости, представленные в работе [1].

Экспериментальное определение коэффициента засаливания зерна выполнили на установке, позволяющей осуществлять царапание образца единичным абразивным зерном. Глубина внедрения зерен в образец составляла 3 и 6 мкм. В первом случае реализуется процесс пластического деформирования, во втором – микрорезание материала образца.

Коэффициент засаливания определяли как отношение площади налипов, образовавшихся на площадке затупления зерна, к площади этой площадки. При помощи микроскопа РМЕ площадку затупления фотографировали, затем сканировали полученное изображение и, используя программный продукт FOTOSHOP, оценивали площадь налипов. На заготовку накладывали УЗК с помощью устройства, описанного в работах [15; 18].

Экспериментальная установка для исследования процесса засаливания единичных абразивных зерен при

царапании с наложением колебаний создана на базе плоскошлифовального станка (рис. 1). Зерна закрепляли в держателе 1, жестко связанном с планшайбой, установленной на шпинделе плоскошлифовального станка.

Оценку работоспособности шлифовального круга при наложении на шлифуемую заготовку УЗК производили в процессе плоского маятникового шлифования заготовок из стали 3Х3М3Ф и коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Эти стали относятся к 1-й и 3-й группам обрабатываемости материалов шлифованием. Рабочая скорость круга 25А25(F60)ПСМ1(К)6К6(V) составляла 35 м/с; врезная подача – 0,01 мм/дв. ход; скорость продольной подачи стола станка 3Е710В-1 – 10 м/мин. На заготовку накладывали колебания частотой $f=22000$ Гц в направлении, совпадающем с осью круга. Амплитуду колебаний изменяли в пределах 3...12 мкм. При этом за счет распространения в заготовке сдвиговых волн ее частицы колебались и в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Моделирование температур при шлифовании показало, что колебания заготовки с амплитудой 3 мкм в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, позволяют уменьшить температуры заготовки на глубине 2 и 50 мкм на 21 и 15 % соответственно. Средние по зонам контакта режущего зерна

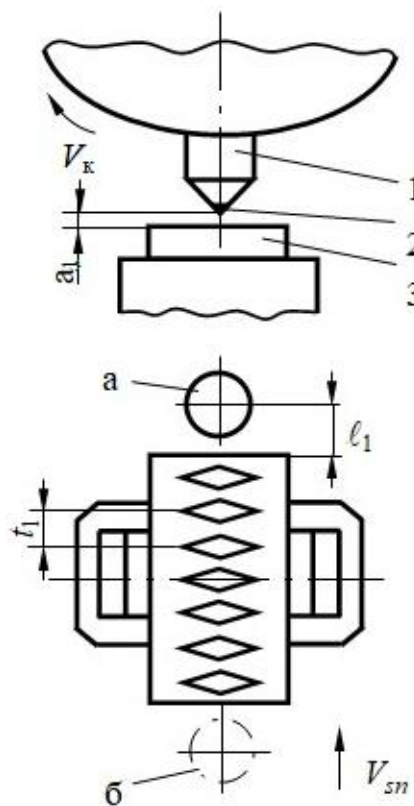


Рис. 1. Схема царапания образца единичным зерном:
1 – держатель; 2 – абразивное зерно; 3 – образец
Fig. 1. The scheme of specimen scratching with a single grain:
1 – a carrier; 2 – an abrasive grain; 3 – a specimen

с заготовкой T_2 и со стружкой T_2' температуры при наложении колебаний снизились в среднем на 40 %. Средняя температура в зоне контакта пластически деформирующего зерна с заготовкой $T_{2п}$ уменьшилась на 13 % (таблица 1). Математические модели для расчета коэффициента засаливания K_3 зерна в зависимости от локальной температуры T_2 в зоне контакта зерна с заготовкой приведены в работе [1].

Для образцов из стали 3Х3М3Ф регрессионные модели имеют следующий вид:

– при глубине внедрения зерна в материал заготовки $a_z=3$ мкм (пластически деформирующее зерно)
 $K_3 = 0,016 \cdot n_g + 0,027 \cdot T_2 - 42$;

– при $a_z=6$ мкм (режущее зерно)
 $K_3 = 0,019 \cdot n_g + 0,024 \cdot T_2 - 42,3$.

Из этих зависимостей следует, что интенсивность засаливания зерна увеличивается с ростом локальной температуры и числа взаимодействий зерна с заготовкой.

Результаты расчета по вышеприведенным зависимостям коэффициентов K_3 с использованием результатов моделирования локальных температур (таблица 1) представлены в таблице 2.

Коэффициент засаливания пластически деформирующего зерна при шлифовании без УЗК на 40 % ниже, чем режущего, что связано с меньшими значениями локальной температуры на этом зерне. Наложение УЗК амплитудой $A_y=3$ мкм способствует снижению K_3 на 33 % для режущего и на 7 % для пластически деформирующего зерна. Меньшая степень снижения ко-

эффициента засаливания для пластически деформирующего зерна связана с меньшим влиянием УЗК на температуру T_2 этих зерен.

При увеличении скорости продольной подачи с 10 до 20 м/мин коэффициент засаливания K_3 увеличивается на 23 % при шлифовании без УЗК ($A_y=0$) и на 9 % при наложении колебаний амплитудой $A_y=3$ мкм (таблица 3).

Увеличение глубины шлифования с 0,01 до 0,03 мм приводит к незначительному увеличению K_3 – на 5 и 2 % при диспергировании без УЗК и с применением УЗК соответственно. Следовательно, при интенсификации режима шлифования (увеличении скорости продольной подачи или глубины шлифования) коэффициент засаливания K_3 увеличивается в меньшей степени при шлифовании с УЗК.

При шлифовании с использованием УЗК со скоростью продольной подачи 20 м/мин и глубиной шлифования 0,03 мм коэффициент K_3 ниже на 17 и 23 % соответственно, чем при шлифовании со скоростью подачи 10 м/мин и глубиной 0,01 мм без применения УЗК. Следовательно, применение УЗК может позволить значительно интенсифицировать режим и увеличить производительность шлифования.

После выхода зерна из зоны контакта с заготовкой в процессе остывания в налипках появляются напряжения, обусловленные разностью коэффициентов линейного расширения материалов налива (заготовки) и абразивного зерна. На эти напряжения значительное влияние оказывает локальная температура в зоне

Таблица 1. Результаты расчета температур для процесса шлифования заготовок из стали 3Х3М3Ф
Table 1. The results of calculation of temperatures for the process of grinding of 3H3M3F steel workpieces

| Амплитуда УЗК A_y , мкм | Средняя температура заготовки T_1 , К | | Температура T_2 , К | Температура T_2' , К | Температура $T_{2п}$, К |
|---------------------------|---|-------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | на глубине 2 мкм | на глубине 50 мкм | | | |
| 0 | 1466 | 1276 | 3472 | 3032 | 1830 |
| 3 | 1158 | 1081 | 2120 | 1817 | 1585 |

Таблица 2. Коэффициент засаливания K_3 режущих и пластически деформирующих абразивных зерен из электрокорунда нормального при диспергировании заготовок из стали 3Х3М3Ф
Table 2. Glazing coefficient K_3 of cutting and plastic deforming abrasive grains of fused aluminum oxide when grinding 3H3M3F steel workpieces

| Амплитуда УЗК A_y , мкм | Вид диспергирования материала заготовки | Средняя локальная температура на площадке контакта зерна с заготовкой T_2 , К | Коэффициент засаливания K_3 , % |
|---------------------------|---|---|-----------------------------------|
| 0 | Пластическое деформирование | 1830 | 39,4 |
| | Микрорезание | 3472 | 78,7 |
| 3 | Пластическое деформирование | 1585 | 32,8 |
| | Микрорезание | 2120 | 45,7 |

контакта зерна с образцом (заготовкой), поскольку образование налипа происходит именно при этой температуре.

Локальная температура в зоне контакта с образцом режущих зерен (глубина внедрения $a_z=6$ мкм) на 70–80 % выше, чем в зоне контакта зерен, производящих пластическое деформирование ($a_z=3$ мкм) (таблица 4). Наложение на образец колебаний привело к уменьшению локальных температур в среднем на 14 %, поэтому сжимающие напряжения в зоне контакта налипа с абразивным зерном, рассчитанные по аналитической зависимости, при использовании УЗК оказались выше на 90 %.

С увеличением значения этих напряжений вероятность разрушения налипа уменьшается. Следовательно, снижение коэффициента засаливания при наложении УЗК на заготовку (образец) происходит главным образом вследствие снижения интенсивности процесса налипания частиц шлифовального шлама на абразивные зерна за счет схватывания.

С целью определения экспериментальных значений коэффициента засаливания K_3 , осуществляли царапание образца единичными абразивными зёрнами. При наложении на образец УЗК коэффициент засаливания снижается на 15...20 %, что объясняется уменьшением локальной температуры.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований, в процессе которых оценивали работоспособность шлифовальных кругов при наложении на заготовку УЗК.

При шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т с наложением на заготовку колебаний коэффициент шлифования $K_{ш}$ увеличивается на 70 и 37 % соответственно за счет снижения интенсивности изнашивания и засаливания рабочей поверхности круга (рис. 2). При обработке заготовок из более труднообрабатываемой стали 12Х18Н10Т (3-я группа обрабатываемости шлифованием) коэффициент шлифования без наложения и с наложением колебаний ниже в 2...2,5 раза, чем при обработке заготовок из стали 3Х3М3Ф.

Использование колебаний позволяет в большей степени повысить коэффициент шлифования заготовок из стали 3Х3М3Ф (на 70 %), относящейся к 1-й группе обрабатываемости. Максимальное увеличение коэффициента $K_{ш}$ зафиксировано при амплитудах колебаний в направлении, совпадающем с осью круга, равных 6 и 9 мкм при обработке заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т соответственно. Период стойкости круга при использовании колебаний увеличивается в 2...3 раза.

Таблица 3. Коэффициент засаливания K_3 режущих абразивных зерен из электрокорунда нормального при шлифовании с различным режимом заготовок из стали 3Х3М3Ф

Table 3. Glazing coefficient K_3 of cutting and plastic deforming abrasive grains of fused aluminum oxide when grinding 3H3M3F steel workpieces under various modes

| Глубина шлифования t , мм | Скорость продольной подачи $V_{s_{пр}}$, м/мин | Амплитуда УЗК | | | |
|-----------------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | | $A_y=0$ мкм | | $A_y=3$ мкм | |
| | | Локальная температура T_2 , К | Коэффициент засаливания K_3 , % | Локальная температура T_2 , К | Коэффициент засаливания K_3 , % |
| 0,01 | 10 | 2778 | 62,4 | 1696 | 36,4 |
| 0,01 | 15 | 3063 | 69,2 | 1870 | 40,6 |
| 0,01 | 20 | 3767 | 86 | 2086 | 45,7 |
| 0,02 | 10 | 2875 | 64,7 | 1760 | 37,9 |
| 0,03 | 10 | 2984 | 67,3 | 1825 | 39,5 |

Таблица 4. Результаты численного моделирования локальных температур на площадке контакта зерна с образцом в процессе микрорезания и напряжений $\sigma_{нт}$ в налипе

Table 4. The results of numerical simulation of local temperatures in the grain-specimen contact area in the process of micro-cutting and the stresses $\sigma_{нт}$ in the sticking area

| Глубина внедрения зерна в материал образца a_z , мкм | Средняя локальная температура, К | Напряжения $\sigma_{нт}$, МПа |
|--|----------------------------------|--------------------------------|
| 3 | 710 / 610* | 380 / 720* |
| 6 | 1250 / 1075 | 60 / 115 |

* В числителе приведены результаты, полученные без наложения на образец колебаний, в знаменателе – с наложением

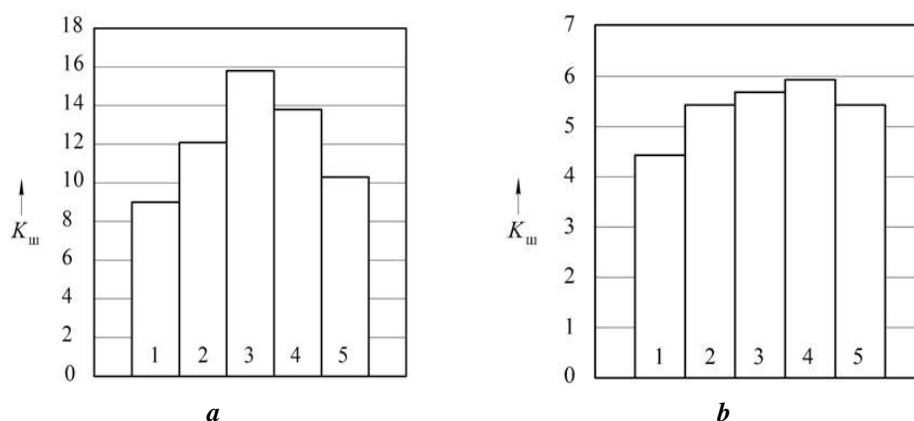


Рис. 2. Влияние амплитуды УЗК на коэффициент шлифования $K_{ш}$:
a – материал заготовки – сталь 3Х3М3Ф; **b** – сталь 12Х18Н10Т.
 1, 2, 3, 4, 5 – амплитуда колебаний $A_z=0, 3, 6, 9, 12$ мкм соответственно
Fig. 2. The influence of UV amplitude on the grinding coefficient $K_{ш}$:
a – workpiece material – 3H3M3F steel; **b** – 12H18N10T steel.
 1, 2, 3, 4, 5 – vibrations amplitude $A_z=0, 3, 6, 9, 12$ μm respectively

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение степеней снижения коэффициента засаливания K_3 при шлифовании с УЗК, полученных расчетным (до 33 %) и экспериментальным путем (до 20 %), показывает возможность использования полученных моделей для расчета коэффициента K_3 .

Выполненные исследования позволяют установить, что при наложении на заготовку УЗК налипание частиц материала заготовки на абразивные зерна снижается за счет уменьшения интенсивности процесса схватывания контактирующих объектов (материалов заготовки и абразивного зерна) вследствие снижения локальной температуры. Увеличение сжимающих напряжений в зоне контакта налива с абразивным зерном при снижении локальной температуры оказывает незначительное влияние на коэффициент засаливания.

Численным моделированием температур и коэффициента K_3 при различных режимах шлифования установлено, что если при шлифовании с применением колебаний увеличить производительность шлифования в 2...3 раза, то локальные температуры и коэффициент K_3 окажутся ниже, чем при шлифовании с меньшей производительностью без УЗК. Однако при оценке возможности увеличения производительности шлифования следует учитывать и другие технологические ограничения, связанные с формированием параметров качества деталей (погрешность размера, параметры микро- и макрогеометрии и др.).

Теоретико-экспериментальные исследования процесса засаливания подтвердились результатами экспериментальных исследований, в процессе которых производили шлифование заготовок из пластичных материалов. При использовании колебаний вследствие уменьшения интенсивностей изнашивания и засаливания рабочей поверхности шлифовального круга существенно увеличиваются коэффициент шлифования и период стойкости круга. Следовательно, наложение УЗК на заготовку в процессе шлифования позволяет повысить производительность обработки

или (и) период стойкости круга при обеспечении заданных параметров качества деталей.

ВЫВОДЫ

1. Использование ультразвуковых колебаний (УЗК) амплитудой 3 мкм приводит к снижению: локальных температур процесса шлифования на 13...40 %; коэффициента засаливания абразивного зерна, полученного расчетным путем, на 33 % для режущего и на 7 % для пластически деформирующего зерна.
2. При увеличении продольной подачи и глубины шлифования коэффициент засаливания при обработке с использованием УЗК увеличивается в меньшей степени, чем без его применения.
3. Наложение УЗК на образец при микрорезании единичным зерном обеспечивает снижение коэффициента засаливания, полученного экспериментальным путем, на 15...20 %.
4. Наложение на заготовку УЗК с помощью приспособления, в котором она является одним из звеньев колебательной системы, обеспечивает увеличение коэффициента шлифования до 70 % и периода стойкости круга в 2...3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 298 с.
2. Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Василик Н.Я., Ковалева М.Г., Прозорова М.С., Арсеенко М.Ю. Нанесение керамических покрытий с помощью многокамерного газодинамического ускорителя // Сварщик. 2015. № 3. С. 20–24.
3. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Модели шлифования: теория и эксперимент. М.: Известия, 2018. 311 с.
4. Медведева О.И., Янюшкин С.А. Исследование качества поверхности твердого сплава после комбиниро-

- рованного электроалмазного шлифования // Механика XXI века. 2016. № 15. С. 189–194.
5. Thanedar A., Dongre G.G., Joshi S.S. Analytical Modelling of Temperature in Cylindrical Grinding to Predict Grinding Burns // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. Vol. 20. № 1. P. 13–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00037-9>.
 6. Носенко В.А. Влияние контактного взаимодействия на износ абразивного инструмента при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 1. С. 73–77.
 7. Носенко В.А., Фетисов А.В., Носенко С.В. Интенсивность контактного взаимодействия и переноса материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов // *Научные технологии в машиностроении*. 2017. № 10. С. 9–17. DOI: https://doi.org/10.12737/article_59d496eb7ba532.91441180.
 8. Stachurski W., Sawicki J., Krupanek K., Nadolny K. Numerical analysis of coolant flow in the grinding zone // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 104. № 5-8. P. 1999–2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03966-x>.
 9. Носенко В.А., Сердюков Н.Д., Шкода О.М., Самарский П.И. Испытание СОЖ на операции плоского врезного шлифования титанового сплава // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 8. С. 40–43.
 10. Казанцев В.Ф., Калачев Ю.Н., Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Инструменты для ультразвуковой очистки. М.: Техполиграфцентр, 2017. 181 с.
 11. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
 12. Toth M., Sims N.D., Curti D. An analytical study of wheel regeneration in surface grinding // *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 82. P. 214–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.046>.
 13. Коряжкин А.А., Носенко С.В., Носенко В.А. Повышение эффективности обработки рабочих лопаток компрессора из титанового сплава методом многокоординатного глубинного шлифования // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2019. № 1. С. 17–21.
 14. Li D., Tang J., Chen H., Shao W. Study on grinding force model in ultrasonic vibration-assisted grinding of alloy structural steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. № 5-8. P. 1467–1479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2929-2>.
 15. Унянин А.Н., Сарайнов Н.Е. Моделирование температурного поля при шлифовании кругами из эльбора с наложением ультразвуковых колебаний // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 8-2. С. 112–120.
 16. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. 2-е изд., доп. и испр. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
 17. Yu T., Su H., Dai J., Zhou W. Grinding Force and Specific Grinding Energy in Process of Grinding SiC with Single Grit // *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 2018. Vol. 50. № 1. P. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.16356/j.1005-2615.2018.01.017>.
 18. Унянин А.Н. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. № 3. P. 193–197. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1803022X>.
 19. Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. 238 с.
 20. Унянин А.Н. Исследование температурного поля при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 2-2. С. 191–195.

REFERENCES

1. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifovalnykh krugov* [Minimizing brining grinding wheels]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2007. 298 p.
2. Tyurin Yu.N., Kolisnichenko O.V., Vasilik N.Ya., Kovaleva M.G., Prozorova M.S., Arsenko M.Yu. Application of ceramic coatings using multiple-cavity gas-dynamic accelerator. *Svarshchik*, 2015, no. 3, pp. 20–24.
3. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Modeli shlifovaniya: teoriya i eksperiment* [Grinding models: theory and experiment]. Moscow, Izvestiya Publ., 2018. 311 p.
4. Medvedeva O.I., Yanyushkin S.A. Studing of quality of the surface carbide after combined electro diamond grinding. *Mekhaniki XXI veku*, 2016, no. 15, pp. 189–194.
5. Thanedar A., Dongre G.G., Joshi S.S. Analytical Modelling of Temperature in Cylindrical Grinding to Predict Grinding Burns. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 13–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00037-9>.
6. Nosenko V.A. Contact interaction impact upon abrasive tool wear at grinding. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2005, no. 1, pp. 73–77.
7. Nosenko V.A., Fetisov A.V., Nosenko S.V. Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching. *Nauchnye tekhnologii v mashinostroenii*, 2017, no. 10, pp. 9–17. DOI: https://doi.org/10.12737/article_59d496eb7ba532.91441180.
8. Stachurski W., Sawicki J., Krupanek K., Nadolny K. Numerical analysis of coolant flow in the grinding zone. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 104, no. 5-8, pp. 1999–2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03966-x>.
9. Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Shkoda O.M., Samarskiy P.I. Coolant test at the process of flat infeed grinding of titanium alloy. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 8, pp. 40–43.
10. Kazantsev V.F., Kalachev Yu.N., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. *Instrumenty dlya ultrazvukovoy ochistki* [Instruments for Ultrasonic Cleaning]. Moscow, Tekhpolygontsentr Publ., 2017. 181 p.
11. Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [The technologist's reference book]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p.

12. Toth M., Sims N.D., Curti D. An analytical study of wheel regeneration in surface grinding. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 82, pp. 214–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.046>.
13. Koryazhkin A.A., Nosenko S.V., Nosenko V.A. Improving of efficiency of the processing of working compressor blades made of titanium alloy by method of multi-axis creep-feed grinding. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 17–21.
14. Li D., Tang J., Chen H., Shao W. Study on grinding force model in ultrasonic vibration-assisted grinding of alloy structural steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, no. 5-8, pp. 1467–1479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2929-2>.
15. Unyanin A.N., Saraynov N.E. The simulation of local temperatures during grinding CBN circles superimposed ultrasonic vibrations. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 8-2, pp. 112–120.
16. Zubchenko A.S., ed. *Marochnik staley i splavov* [Grinding of steels and alloys]. 2nd ed., dop. i ispr. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
17. Yu T., Su H., Dai J., Zhou W. Grinding Force and Specific Grinding Energy in Process of Grinding SiC with Single Grit. *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.16356/j.1005-2615.2018.01.017>.
18. Unyanin A.N. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 3, pp. 193–197. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1803022X>.
19. Bokuchava G.V. *Tribologiya protsessa shlifovaniya* [Tribology of Grinding]. Tbilisi, Sabchota Sakartvelo Publ., 1984. 238 p.
20. Unyanin A.N. The study of temperature field when grinding with ultrasonic activation. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2, pp. 191–195.

The enhancement of cutting capacity of a grinding wheel when processing ductile steel blank parts by ultrasonic activation

© 2021

*Aleksandr V. Khazov*¹, chief engineer*Aleksandr N. Unyanin*^{*2,3}, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Technology of Mechanical Engineering”¹*JSC Ulyanovsk Mechanical Plant, Ulyanovsk (Russia)*²*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)**E-mail: a_un@mail.ru³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

Abstract: The study aimed to identify the relations between the sticking intensity and ultrasonic vibrations (UV) used for processing and evaluate the wheels' performance when grinding ductile materials blank parts. The authors carried out the numerical simulation of local temperatures and the 3H3M3F steel workpiece temperature when grinding by ultrasonic activation. The study determined that the application of ultrasonic vibrations with the amplitude of 3 μm causes the decrease in local temperatures by 13...40 %, and in blank part temperature – up to 20 %. The calculation identified that the activation of ultrasonic vibrations with the amplitude of 3 μm causes the decrease in the glazing coefficient by 33 % for cutting grain and by 7 % for deforming grain. When increasing the longitudinal feed rate or the grinding depth, the glazing coefficient increases to a lesser degree when using the ultrasonic vibration than in the case without ultrasonic activation. The authors carried out the numerical simulation of local temperatures when scratching the 3H3M3F steel specimens by single abrasive grains with ultrasonic activation. The sticking deformation and the stresses resulted from this deformation and affecting the junction points of sticking with grains with and without ultrasonic vibrations application are calculated. The experimental research included the micro-cutting of specimens with single abrasive grains. The experiments identified that the abrasive grains wear out and glaze to a lesser degree when micro-cutting a workpiece with ultrasonic vibrations activation. The lowering of the intensity of sticking of the workpiece material particles to the abrasive grains due to the adhesion causes the decrease in the glazing coefficient when using ultrasonic activation. The study considered the possibility to enhance the efficiency of flat grinding through the use of the energy of ultrasonic vibrations applied to a blank part in the direction with the grinding wheel axis. A workpiece fixed in the device between the vibration transducer and the support is one of the components of a vibration system. The authors performed the experiment when grinding 3H3M3F and 12H18N10T steel workpieces with the wheel face. When grinding with ultrasonic vibrations, the grinding coefficient increases up to 70 %, and the redress life increases twice or thrice.

Keywords: grinding; ultrasonic vibrations; UV; abrasive grain; blank part; sticking; glazing; ductile material; 3H3M3F steel; 12H18N10T steel.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Ulyanovsk Region Government within the scientific project No. 19-48-730002.

For citation: Khazov A.V., Unyanin A.N. The enhancement of cutting capacity of a grinding wheel when processing ductile steel blank parts by ultrasonic activation. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 55–62. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-55-62.