

УДК 621.923

А.А. Якимов, докт. техн. наук, Н.Н. Клименко, канд. техн. наук,  
Ю.В. Шихирева, канд. техн. наук, Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук  
Одесса, Украина

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Рассмотрено повышение качества поверхностного слоя при шлифовании деталей с композиционным покрытием из плакированного никель-фосфором и медью карбида титана в результате подачи СОЖ в зону контакта круга с деталью под рассчитанным давлением, несколько большим, чем давление воздуха в контактной зоне, позволяющим получить максимальный охлаждающий эффект.*

*Установлена зависимость давления воздуха в зоне контакта круга с деталью от изменения режимов шлифования. Определены температура поверхности, остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка при шлифовании различными кругами с использованием СОЖ.*

**Ключевые слова:** *качество поверхностного слоя, подача охлаждения под давлением, композиционное покрытие.*

*Розглянуто підвищення якості поверхневого шару при шліфуванні деталей з композиційним покриттям із плакованого нікель-фосфором і міддю карбиду титану в результаті подачі СОЖ у зону контакту круга з деталлю під розрахованим тиском, трохи більшим, ніж тиск повітря в контактній зоні, що дозволяють одержати максимальний охолоджуючий ефект.*

*Установлена залежність тиску повітря в зоні контакту круга з деталлю від зміни режимів шліфування. Визначені температура поверхні, залишкові напруження на поверхні деталі й на границі покриття-підложка при шліфуванні різними кругами з використанням ЗОР.*

**Ключові слова:** *якість поверхневого шару, подача охолодження під тиском, композиційне покриття.*

*Improvement of quality of a superficial layer is considered at grinding details with a composite covering from plated by nickel - phosphorus and copper titanium carbide as a result of submission cutting fluid in a zone of contact of a circle with a detail under the designed pressure, a little bit big, than pressure of air in the contact zone, allowing to receive the maximal cooling effect.*

*Dependence of pressure of air in a zone of contact of a circle with a detail from change of modes of grinding. Is established the temperature of a surface, residual pressure on a surface of a detail and on border a covering - substrate are determined at grinding by various circles with use cutting fluid.*

**Key words:** *quality of a superficial layer, submission of cooling under pressure, a composite covering.*

**Введение:** Во многих отраслях техники сейчас уделяется большое внимание композиционным материалам, в которых карбиды либо другие тугоплавкие соединения являются армирующими включениями в более пластичном основном материале. Одним из наиболее прогрессивных способов получения таких композиционных покрытий является высокотемпературное напыление плазменной струей.

Проведенные исследования показали, что наилучшими свойствами по износостойкости и долговечности обладают поверхности полученные путем

плазменного напыления двухблочковым композиционным плакированным порошком TiC-NiP-Cu.

Применение композиционных покрытий из тугоплавких соединений (на основе карбида титана) позволяет заменить дорогостоящие и редкие металлы менее дефицитными материалами без существенного изменения работоспособности деталей, повысить износо- и коррозионную стойкости деталей, их антифрикционные свойства, надежность и долговечность [1].

Широкое внедрение композиционных покрытий сдерживается трудностями, возникающими в процессе их финишной обработки, где в основном используется шлифование. Шлифование напыленных покрытий характеризуется напряженным состоянием напыленной поверхности. Это обусловлено опасностью отслоения покрытия, которая возникает в процессе шлифования, либо в процессе последующей эксплуатации деталей с покрытиями [2].

Известно, что возникновение дефектов типа прижогов, трещин и отслоения покрытия от подложки связаны с напряжениями возникающими в поверхностном слое. Эти напряжения, особенно при шлифовании труднообрабатываемых материалов, носят температурный характер.

Важным фактором, влияющим на качество поверхностного слоя, как на операции нанесения покрытия, так и при шлифовании, является тепловое воздействие. Исследования температурных остаточных напряжений показывают, что величина напряжений, формирующихся при напылении, обычно в несколько раз меньше, чем при шлифовании. Температурный градиент при шлифовании значительно выше, чем при напылении, так как при напылении деталь прогревается более равномерно. При шлифовании происходит более быстрое нагревание и охлаждение отдельных участков поверхности детали, при этом контактные температуры могут достигать 1000-1200°C [3]. Совокупность этих факторов создает благоприятные условия для формирования значительных температурных напряжений. Высокие контактные температуры образуют трещины, свидетельствующие о браке в напыленном слое. Для избежания образования трещин необходимо снизить контактную температуру, что можно достигнуть с применением СОЖ.

**Постановка задачи:** Задача состоит в расчете необходимого давления СОЖ, что создало бы дополнительные возможности управления качественными характеристиками поверхностного слоя детали при шлифовании.

При вращении шлифовального круга вокруг него циркулируют мощные воздушные потоки, отбрасывающие СОЖ и препятствующие проникновению ее в зону контакта круга с деталью [4]. Это явление связано не только с тем, что воздух выбрасывается через поры шлифовального круга, но и с определенными аэродинамическими закономерностями, присущими обтеканию воздухом вращающегося диска. При шлифовании в зоне контакта

круга с деталью давление воздуха может доходить до 2 МПа, в связи с чем создаются дополнительные препятствия для проникновения туда СОЖ. Однако, нет строгих теоретических или экспериментальных зависимостей, которые давали бы возможность связать величину давления воздуха с режимами шлифования и свойствами шлифовальных кругов, что позволило бы научно обоснованно рассчитать давление СОЖ.

Возле вращающегося шлифовального круга, даже если он изготовлен из непористого материала, всегда существует пограничный слой воздуха, вращающийся вместе со шлифовальным кругом и вовлекаемый в зону контакта круга с деталью [4]. Взаимодействие воздуха с кругом и с деталью в зоне контакта можно рассматривать исходя из следующих соображений.

Если рассмотреть пространство, заключенное между условной наружной поверхностью круга и условной поверхностью связки, то можно увидеть, что это пространство заполнено выступающими из связки зернами, между которыми находится воздух. Таким образом, между зернами шлифовального круга и его условными поверхностями имеются некоторые объемы воздуха. Во время резания обрабатываемого материала кругом зерна последнего частично будут углубляться в материал, а частично – в связку. Это приведет к тому, что расстояние между условными поверхностями уменьшится, а, следовательно, уменьшатся и объемы воздуха.

Кроме того, во время резания обрабатываемого материала зернами круга возникает высокая температура, происходит большое тепловыделение, в результате которого температура воздуха, заключенного между зернами должна повыситься.

Таким образом, при шлифовании воздух, проникший в зону контакта круга с деталью, подвергается одновременному сжатию и нагреву, в связи с чем в первом приближении можно применить уравнение Менделеева-Клапейрона состояния идеального газа [5]. В соответствии с этим уравнением давление воздуха будет:

$$P_e \approx \frac{RT}{V}, \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R=8,31441$  Дж/(К·моль);

$V$  – объем воздуха;

$T$  – температура в °К.

Реальные газы с хорошим приближением подчиняются этому объединенному газовому закону лишь при малых плотностях, то есть при не слишком больших давлениях и высоких температурах.

Так как воздух – реальный газ, то давление воздуха в зоне контакта круга с деталью можно определить, используя уравнение Ван-дер-Ваальса состояния реального газа, которое имеет вид:

$$\left(P + a/V^2\right)(V - b) = RT, \quad (2)$$

где  $P$  – давление;

$V$  – удельный объем газа;

$T$  – абсолютная температура;

$a$  и  $b$  – константы,  $a=0,1350 \text{ м}^4 \cdot \text{Н/моль}^2$ ,  $b=38,620 \text{ см}^3/\text{моль}$ .

Константа  $b$  определяет суммарный объем, занятый всеми молекулами газа вследствие конечности их размеров, а поправка  $a/V^2$  – некоторое “внутреннее” давление, обусловленное взаимным притяжением молекул.

Повышение давления в связи со сжатием и повышением температуры воздуха может быть рассчитано по выражению:

$$P = \frac{4,9 \cdot \left( RT - 0,37 \frac{a}{V} + 0,49 \frac{ab}{V^2} \right)}{V - 1,3b} \quad (3)$$

Как показывают результаты расчетов, наибольшие величины давления следует ожидать при шлифовании мягкими кругами М1-М2. Можно предположить, что в этом случае давление воздуха будет повышаться в большей степени, вследствие значительного уменьшения объемов между зернами из-за большого углубления зерен в мягкую связку. В диапазоне зернистостей М3, СМ1-СМ2, С1-С2 наблюдается определенное повышение давления. Можно допустить, что в этом случае большое влияние имеет эффект увеличения температуры при увеличении твердости круга.

Уменьшение зернистости круга приводит к уменьшению величины углубления зерна в связку, однако в это же время, в связи с уменьшением зернистости, происходит рост температуры шлифования, в результате чего увеличивается давление воздуха в зоне контакта круга с деталью, что согласуется с (3). Расчеты показывают также, что более напряженным режимам обработки соответствуют большие давления воздуха в зоне контакта круга с деталью.

Для целей математического моделирования тепловой поток, при охлаждении эмульсией, проникающей в зону контакта круга с деталью, рассчитывается исходя из известных термодинамических закономерностей конвективного теплообмена между нагретой поверхностью и охлаждающей жидкостью [5]. Тепловой поток, который переходит в деталь:

$$Q_2 = Q - Q_1, \quad (4)$$

где  $Q_2$  – тепловой поток, поглощаемый деталью, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q$  – значение величины теплового потока при отсутствии СОЖ, Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_1$  – часть теплового потока, переходящего в СОЖ, по закону конвективного теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>;

$$Q_1 = F \cdot a_1 \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где  $F$  – площадь охлаждаемой поверхности ( $F = \sqrt{Dt} \cdot s$ ), м<sup>2</sup>;

$a_1$  – коэффициент температуропроводности, с<sup>-1</sup>;

$\Delta T$  – разность температур между температурой нагретой поверхности и температурой СОЖ ( $\Delta T = T - 20^\circ$ ), °С;

$T$  – температура поверхности при шлифовании без СОЖ, °С.

Следовательно, тепловой поток, переходящий в деталь:

$$Q_2 = Q - \sqrt{Dt} \cdot s \cdot a_1 \cdot (T - 20^\circ). \quad (6)$$

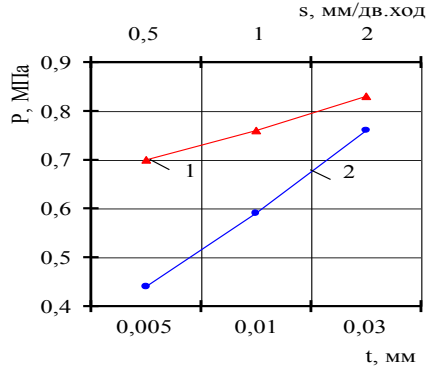
**Экспериментальное исследование:** Экспериментальные измерения [6] показали, что давление воздуха в зоне контакта круга с деталью зависит как от режимов обработки, так и от характеристик кругов. Максимальная величина давления, которая была зарегистрирована экспериментально, составляет 1,2 МПа. Величина давления повышается при увеличении твердости шлифовального круга. Эксперимент не подтвердил данных расчетов о том, что давление воздуха при шлифовании кругами М1-М2 имеет максимальную величину. Вероятное углубление зерен в связки разных твердостей в значительной степени выравнивается из-за податливости системы СПИД. Уменьшение зернистости приводит к росту давления. Увеличение режимов также способствует увеличению давления воздуха в зоне контакта круга с деталью.

Следовательно, подавая СОЖ в зону контакта шлифовального круга с деталью под давлением меньшим, равным или большим, чем давление воздуха в этой зоне в данный момент, можно получить различную степень проникновения туда СОЖ.

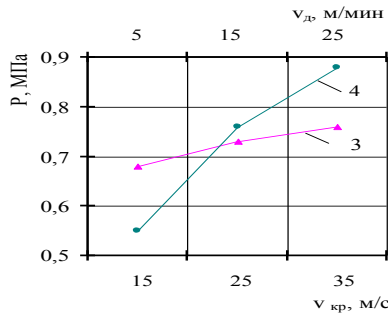
Давление СОЖ необходимо выбирать таким, чтобы оно было несколько больше, чем давление воздуха в контактной зоне. Как правило, СОЖ без труда проникает в зону контакта круга с деталью, когда ее давление на 10-15% выше, чем давление воздуха. Можно рассчитать такое давление СОЖ, которое обеспечивало бы гарантированное проникновение ее в зону контакта круга с деталью и максимальный охлаждающий эффект. Такая методика подачи СОЖ дает возможность снижать температуру шлифования до предельно допустимых значений.

Если при шлифовании без охлаждения или при шлифовании с охлаждением поливом величина температуры уменьшилась за счет засаливания круга, то при подаче СОЖ под давлением значения этой температуры практически не зависит от времени шлифования в связи с тем, что круг хорошо моется струей СОЖ и практически не засаливается.

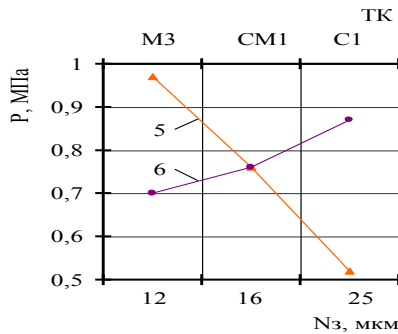
Математическое моделирование подачи СОЖ под давлением дало возможность установить зависимость давления воздуха в зоне контакта круга с деталью от изменения режимов шлифования (Рис. 1).



а)



б)



в)

Рис. 1. Зависимость давления воздуха в зоне контакта шлифовального круга (63С25СМ16К5) с деталью от: а – глубины резания (1) и поперечной подачи (2), б – скорости шлифовального круга (3) и скорости детали (4), в – зернистости шлифовального круга (5) и его твердости (6);  $v_{кр}=35$  м/с,  $v_{д}=15$  м/мин,  $s=2$  мм/дв.ход,  $t=0,01$  мм

Как видно из графиков, в диапазоне применяемых режимов шлифования напыленного слоя наибольшее значение давления составляет величину порядка 1 МПа. Следовательно, давление СОЖ, превышающее эту величину на 10-15%, обеспечит гарантированное проникновение СОЖ в зону контакта круга с деталью. Следует учитывать, что моделирование было проведено для наиболее неблагоприятного случая шлифования, кругами из карбида кремния зеленого, когда температура шлифования имеет наибольшие значения. При шлифовании электрокорундовыми и алмазными кругами температура поверхности будет ниже и соответственно будет ниже необходимое давление воздуха в зоне контакта круга с деталью. В таблице 1 показаны рекомендуемые значения давления подачи СОЖ для шлифования различными кругами.

Таблица 1 Рекомендуемые значения давления подачи СОЖ для шлифования различными кругами

№ пп	Шлифовальный круг	Давление воздуха в зоне контакта круга с деталью, Р, МПа
1	Электрокорунд белый	0,88
2	Карбид кремния зеленого	0,97
3	Алмазный круг	0,56

Эксперименты и математическое моделирование показали, что при подаче СОЖ под давлением температура и остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка значительно снижаются. Температура поверхности, остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка находятся в следующих пределах при шлифовании с использованием СОЖ кругами из:

- электрокорунда белого:  $T_{c_n} = 350 \div 700^\circ\text{C}$ ,  $G_{c_n} = 18 \div 85$  МПа,

$$G_{c_{n-n}} = (-5) \div 45 \text{ МПа};$$

- карбида кремния зеленого:  $T_{c_n} = 400 \div 800^\circ\text{C}$ ,  $G_{c_n} = 25 \div 110$  МПа,

$$G_{c_{n-n}} = 0 \div 55 \text{ МПа};$$

- алмазными кругами:  $T_{c_n} = 200 \div 425^\circ\text{C}$ ,  $G_{c_n} = (-15) \div 30$  МПа,

$$G_{c_{n-n}} = (-35) \div 5 \text{ МПа}.$$

### Выводы:

1. Давление СОЖ необходимо выбирать таким, чтобы оно было несколько больше, чем давление воздуха в контактной зоне. СОЖ без труда проникает в зону контакта круга с деталью, когда ее давление на 10-15% выше, чем давление воздуха, и обеспечивает максимальный охлаждающий

эффект. Такая методика подачи СОЖ дает возможность снижать температуру шлифования до предельно допустимых значений.

2. При подаче СОЖ под давлением температура и остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка значительно снижаются. Математическое моделирование подачи СОЖ под давлением дало возможность установить зависимость давления воздуха в зоне контакта круга с деталью от изменения режимов шлифования. Показаны рекомендуемые значения давления подачи СОЖ для шлифования различными кругами.

3. Определены температура поверхности, остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка при шлифовании различными кругами с использованием СОЖ.

**Список использованных источников:** 1. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении [Текст] / Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин, А.Ф. – СПб: Политехника. – 2015. – С. 424. 2. Корчак С.Н. Теория обрабатываемости сталей и сплавов при абразивной обработке /С.Н. Корчак //Вестник южно-уральского гос. ун-та.: Сб. науч. трудов (Серия «Машиностроение»). – 2003. –№9. Вып.4. – С.82 – 90. 3. Усов А.В. Современное состояние исследований термомеханических процессов при шлифовании /А.В. Усов, Э. Донеv //Труды Одесск. политехн. ун-та: науч. и призыв.-практ. сб. – Одесса: ОНПУ, 2001. – Вып.5.–С.22 – 27. 4. Мельникова Е.П. Влияние технологических факторов финишной абразивной обработки на качество поверхности / Е.П.Мельникова // Технология машиностроения. – 2003. –№3. – С.13 – 16. 5. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества: учеб. пособие [Текст] / Крайнов А.Ю. – Томск: SST – 2016 – С. 48. 6. Лебедев В.Г. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей /В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, С.А. Аль-Аджелам //Наукові нотатки: Міжвузів. зб. (за напрямком «Інженерна механіка») – Луцк: ЛДТУ, 2013. Вип. 40. – С. 141 – 144.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kremen Z.I. Tehnologiya shlifovaniya v mashinostroenii [Tekst] / Kremen Z.I., Yurev V.G., Baboshkin, A.F. – Spb: Politehnika. – 2015. – S. 424. 2. Korchak S.N. Teoriya obrabatyvaemosti stalei i splavov pri abrazivnoj obrabotke /S.N. Korchak //Vestnik yuzhno-uralskogo gos. un-ta.: Sb. nauch. trudov (Seriya «Mashinostroenie»). – 2003. –№9. Vyp.4. – S.82 – 90. 3. Usov A.V. Sovremennoe sostoyanie issledovaniy termomechanicheskikh processov pri shlifovanii /A.V. Usov, E. Donev //Trudy Odessk. politehn. un-ta: nauch. i prizyv.-prakt. sb. – Odessa: ONPU, 2001. – Vyp.5.–S.22 – 27. 4. Melnikova E.P. Vliyaniye tehnologicheskikh faktorov finishnoj abrazivnoj obrabotki na kachestvo poverhnosti / E.P.Melnikova // Tehnologiya mashinostroeniya. – 2003. –№3. – S.13 – 16. 5. Krajnov A.Yu. Osnovy teploperedachi. Teploperedacha cherez sloj veshstva: ucheb. posobie [Tekst] / Krajnov A.Yu. – Tomsk: SST – 2016 – S. 48. 6. Lebedev V.G. Mehanizm obrazovaniya prizhogov pri shlifovanii detalei iz zakalennyh stalei /V.G. Lebedev, N.N. Klimenko, S.A. Al-Adzhelam //Naukovi notatki: Mizhvuziv. zb. (za napryamkom «Inzhenerna mehanika») – Luck: LDTU, 2013. Vip. 40. – S. 141 – 144.

Надійшла до редколегії 25.06.2018