



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК621.922.02

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027

EDN: GATQLZ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА

Александр Леонидович Верещагин ¹, Николай Сергеевич Алексеев ²

¹Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, Россия

²Рубцовский индустриальный институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Рубцовск, Россия

¹ val@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6061-7064>

² nikolay.alekseev.56@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8950-8229>

Аннотация. К высокоэффективным технологиям восстановления и упрочнения изношенных деталей машин относятся различные способы нанесения износостойких микропористых покрытий на никелевой основе. Высокая адгезионно-химическая активность и низкая теплопроводность этих покрытий создают трудности при их обработке шлифованием. Данные трудности обусловлены повышенным износом абразивного инструмента и интенсивным засаливанием его рабочей поверхности, что приводит к снижению производительности обработки и качества шлифованной поверхности (прижоги, огранка, трещины).

В статье выражен взгляд авторов на проблему абразивной обработки микропористых покрытий восстановленных деталей. Рассмотрены возможности методов физико-химического анализа, а также возможности применения метода равновесной термодинамики для исследования процесса шлифования этих покрытий. Показана правомерность применения термодинамического подхода. Изложена методика выбора абразивных материалов на основе расчётных методов термодинамики. Авторы допускают, что при обработке металлов абразивным инструментом могут иметь место твердофазные процессы химической природы. В связи с этим в статье приводятся необходимые условия для протекания твердофазных реакций и, в частности, реакционная способность различных абразивных материалов и химическая совместимость. Использование установленных закономерностей позволит наметить пути уменьшения износа абразивов за счет снижения активности их взаимодействия с микропористыми покрытиями.

Ключевые слова: микропористые покрытия, абразивная обработка, термодинамический подход, твердофазные реакции, реакционная способность, химическое сродство, механохимические процессы, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Для цитирования: Верещагин А. Л., Алексеев Н. С. Термодинамический подход к выбору абразивного материала // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 195–198. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027. EDN: <https://elibrary.ru/GATQLZ>.

Original article

THERMODYNAMIC APPROACH TO CHOICE OF ABRASIVE MATERIAL

Alexander L. Vereshchagin ¹, Nikolay S. Alekseev ²

¹ Biysk Institute of Technology (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russia

² Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University, Rubtsovsk, Russia

¹ val@bti.secna.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6061-7064>

² nikolay.alekseev.56@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8950-8229>

Abstract. Highly efficient technologies for restoring and strengthening worn machine parts include various methods of applying wear-resistant microporous nickel-based coatings. The high adhesive - chemical activity and low thermal conductivity of these coatings create difficulties when they are processed by grinding. These difficulties are caused by increased wear of the abrasive tool and intensive salting of its working surface, which leads to a decrease in processing performance and the quality of the polished surface (cauterization, faceting, cracks). The article expresses the authors' view on the problem of abrasive treatment of microporous coatings of restored parts. The possibilities of methods of physico-chemical analysis, as well as the possibility of using the method of equilibrium thermodynamics to study the grinding process of these coatings are considered. The validity of the thermodynamic approach is shown. The method of selecting abrasive materials based on computational thermodynamic methods is described. The authors admit that when processing metals with an abrasive tool, solid-phase processes of a chemical nature may occur. In this

© Верещагин А. Л., Алексеев Н. С., 2026

regard, the article provides the necessary conditions for the course of solid-phase reactions and, in particular, the reactivity of various abrasive materials and chemical compatibility. The use of established patterns will make it possible to identify ways to reduce the wear of abrasives by reducing the activity of their interaction with microporous coatings.

Keywords: microporous coatings, abrasive treatment, thermodynamic approach, solid-phase reactions, reactivity, chemical affinity, mechanochemical processes, self-propagating high-temperature synthesis.

For citation: Vereshchagin, A. L. & Alekseev, N. S. (2026). Thermodynamic approach to choice of abrasive material. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 195-198. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027. EDN: <https://elibrary.ru/GATQLZ>.

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление изношенных деталей тракторов, автомобилей, сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники имеет большое народно-хозяйственное значение, так как оно позволяет существенно экономить металл и трудовые затраты [1].

Одним из наиболее эффективных методов восстановления деталей является газотермическое напыление микропористых покрытий на никелевой основе (далее просто покрытий). Основным методом размерной обработки данных покрытий является шлифование.

Однако специфические свойства этих покрытий (высокая пористость, наличие оксидов и шлаков, пониженная теплопроводность и др.) создают трудности при их шлифовании из-за повышенного износа абразивных кругов и их интенсивного засаливания.

Известно [2], что износ абразивных зёрен проявляется в виде раскалывания и истирания. Но если износ в виде раскалывания весьма желателен (самозатачивание), то износ в виде истирания приводит к росту сил резания и интенсивному засаливанию кругов, вследствие чего на зёрнах формируются адгезионные налипы.

Истирание зёрен происходит под воздействием трёх нагрузок [2]: импульсных силовых ударов, импульсных тепловых ударов и термохимического взаимодействия абразивных зёрен и заготовки. Величины первых двух нагрузок в основном зависят от режимов резания, а величина третьей – термохимическое взаимодействие – прежде всего от материала абразива.

Интенсивное термохимическое взаимодействие в контакте абразив–покрытие происходит под влиянием следующих причин: **во-первых**, имеется химическое сродство покрытий к абразивному материалу; **во-вторых**, возникают высокие локальные температуры и давления. В результате создаются благоприятные условия для протекания химических реакций.

Процесс шлифования покрытий можно усовершенствовать путём подбора абразивов, снижающих термохимическое взаимодействие в контакте абразив–покрытие. Однако до настоящего времени не существует научно обоснованных рекомендаций по выбору абразивных материалов для шлифования покрытий.

Поэтому **целью** настоящей работы является обоснование подхода к выбору абразивного материала кругов при шлифовании покрытий.

Прежде всего, рассмотрим возможности различных методов анализа применительно к процессам обработки металлов резанием.

Возможности методов физико-химического анализа для исследования процесса шлифования микропористых покрытий

Механическая обработка металлов резанием – это теплофизический процесс. Источником тепла здесь является работа, затрачиваемая на деформацию металла и на преодоление силы трения. При шлифовании металлов протекают следующие физико-химические явления:

- абразивные зёрна подвергаются интенсивному воздействию высоких контактных давлений и температур;

- стружка и контактные поверхности нагреваются в диапазоне 500...1000 °С;

- протекают интенсивные физико-химические процессы в виде адгезии, диффузии, окисления и т.д.;

- наличие гетерофазных систем, так как реагенты и продукты образуют самостоятельные фазы.

А priori можно допустить, что при металлообработке абразивным инструментом в паре абразив–обрабатываемый материал, кроме различных видов механических воздействий, могут иметь место и такие твердофазные процессы химической природы, как механохимические и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), в весьма специфических неравновесных температурно-временных режимах.

Механохимические процессы обусловлены переходом вещества в метастабильное химически активное состояние, а также интенсификацией массопереноса в результате поглощения механической энергии [3].

Отмечают также влияние механических напряжений на реакционную способность металлов – так металлы в напряженном состоянии в большей степени подвергаются процессам коррозии [4].

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез

В ряде случаев, когда взаимодействие между абразивным элементом и обрабатываемым металлом термодинамически предпочтительно, то возможно и протекание реакции между ними в самоподдерживающемся режиме – режиме СВС [5] и даже в случае металлов [6]. Так, например, взаимодействуют металлы в паре медь–алюминий или никель–алюминий.

К СВС-процессам, например, можно отнести реакцию карбидообразования при обработке железоуглеродистых сплавов алмазным инструментом [7].

Необходимыми условиями для эффективного взаимодействия абразива с обрабатываемым материалом являются наличие поверхности контакта и экзотермичность (отрицательное значение энтальпии и изобарно-изотермического потенциала). Примером могут служить и реакции синтеза с образованием нитридных, карбидных или интерметаллидных фаз и реакции взаимодействия разлагающихся соединений с элементами матрицы [8].

Первопричиной перечисленных выше процессов является химическое сродство материалов, которое в какой-то мере усиливается при механическом напряжении, но реальны только разрешенные реакции с позиций термодинамики. Возможность протекания таких реакций будет возрастать по мере увеличения площади контакта между абразивным элементом и обрабатываемым материалом.

Одной из характерных особенностей твердофазных реакций в случае металлообработки является небольшой размер реакционной зоны, что

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2026

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА

осложняет применение традиционных методов физико-химического анализа для исследования процесса. При этом следует обратить внимание и на то обстоятельство, что массовая доля абразивного материала в стружке составляет доли процента. Это не позволяет применить стандартные методы физико-химического анализа (рентгенофазовый, эмиссионный спектральный, рентгенофотоэлектронную спектроскопию) для исследования фазового и химического состава продуктов взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым металлом, порог чувствительности которых составляет не менее 5 %.

Можно также определять температуру в точке контакта абразива и обрабатываемого металла по спектру излучения. Дополнительным фактором является скорость резания, которая определяет температуру в зоне контакта и давление под влиянием механической нагрузки. Осложняет предсказание состава продуктов взаимодействия и кинетические факторы, обуславливающие скорость превращения за счет диффузии и взаимодействие с атмосферой (в том числе окисление, образование нитридов и т.д.) [9, 10].

Поэтому применение методов физико-химического анализа для выбора абразивного материала кругов при шлифовании покрытий можно считать нецелесообразным.

Возможности применения метода равновесной термодинамики к процессу шлифования микропористых покрытий

Предсказуемость термодинамических расчетов твердофазных реакций осложняется гетерофазностью системы, так как реагенты и продукты образуют самостоятельные фазы, состоящие из очень большого числа структурно упорядоченных частиц. Любая твердофазная реакция совершается в виде существенно большего набора промежуточных состояний, энергетически мало отличающихся одно от другого [9].

Соответственно энтальпия реакции очень мала по сравнению с изменением энтальпии реакций, в которых хотя бы один из реагентов или продуктов не является твердой фазой.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что чисто твердофазное взаимодействие сопровождается и малым изменением энтропии. Этого следовало ожидать, учитывая высокую степень порядка в твердых фазах реагентов и продуктов по сравнению с газо- и жидкофазными.

Особенности твердофазных реакций. Реакционная способность

Согласно принципу Хедвалана, большей реакционной способностью обладает фаза в момент образования или фазового перехода [9, 10]. С учетом этого положения можно оценить химическое сродство основных абразивных материалов к обрабатываемым металлам (табл. 1).

Таблица 1 – Химическая совместимость абразивных неметаллических материалов с металлами [11]
Table 1 – Chemical compatibility of abrasive non-metallic materials with metals [11]

Абразивный материал	Имеет сродство
Алмаз	к карбидообразующим металлам (IV–VII побочных подгрупп Периодической системы и подгруппа железа)
Кубический нитрид бора	к образующим тугоплавкие бориды металлам IV–VII побочных подгрупп Периодической системы
Корунд	к металлам, образующим тугоплавкие оксиды (IV–VII побочных подгрупп Периодической системы) с температурой плавления выше температуры плавления корунда 2050 °C
Карбид кремния	к силицид образующим металлам: большинству d-элементов (кроме Ag, Au, Zn, Cd, Hg) и всех f-элементов; p-металлы силициды не образуют. и к карбидообразующим металлам (IV–VII побочных подгрупп Периодической системы и подгруппа железа) с температурой плавления выше температуры плавления карбида кремния 2730 °C
Нитрид кремния	к силицид образующим металлам: большинству d-элементов (кроме Ag, Au, Zn, Cd, Hg) и всех f-элементов; p-металлы силициды не образуют. с температурой плавления выше температуры плавления нитрида кремния 1900 °C
Карбид бора	к металлам, образующим тугоплавкие карбиды и бориды с температурой плавления выше температуры плавления карбида бора 2350 °C в неокислительной среде

Исследованиями [12] была доказана возможность протекания диффузионных процессов в зоне контакта режущего инструмента с обрабатываемым металлом. Протекание указанных процессов в зоне контакта абразива и шлифуемого материала возможно лишь при наличии химического сродства между ними. Чем больше химическое сродство, тем интенсивнее протекают диффузионные процессы.

Химическая совместимость

Необходимо также принимать во внимание и состав газовой атмосферы: нейтральная (аргон, СОЖ, вакуум), восстановительная (водород) или окислительная (воздух), что также окажет влияние на термостойкость режущего инструмента. В таблице 2 представлена термохимическая оценка окисляемости абразивных материалов.

Таблица 2 – Термохимическая оценка окисления абразивных керамических материалов кислородом воздуха
Table 2 – Thermochemical assessment of the oxidation of abrasive ceramic materials by atmospheric oxygen

Абразивный материал	Термохимическое уравнение реакции окисления	$\Delta_r H^{298}$, кДж	$\Delta_r G^{298}$, кДж/моль
Алмаз	$C_{(алм)} + O_2(g) = CO_2(g)$	-395,7 кДж/моль или -8,95 кДж/г	-397,21
Кубический нитрид бора	$2BN(куб) + 1,5O_2(g) = B_2O_3(т) + N_2(g)$	-1006,1 кДж/моль или -10,27 кДж/г	-984,97
Корунд	$Al_2O_3(т) + O_2(g) \neq$	Не окисляется	
Карбид кремния	$SiC(т, куб) + 2O_2(g) = SiO_2(т) + CO_2(g)$	-1234,2 кДж/моль или -11,87 кДж/г	-1182,29
Нитрид кремния	$Si_3N_4(т) + 3O_2(g) = 3SiO_2(т) + 2N_2(g)$	-1960,47 кДж/моль или -8,30 кДж/г	-1904,43
Карбид бора	$B_4C(т) + 4O_2(g) = 2B_2O_3(т) + CO_2(g)$	-2876,83 кДж/моль или -15,70 кДж/г	-2720,21

Во всех рассмотренных случаях имеют место экзотермические реакции с высоким удельным тепловыделением и отрицательным изобарно-изотермическим потенциалом, что может приводить к повышенному износу абразивного инструмента за счет реакции окисления за исключением чистого корунда.

Возможность применения расчетных методов классической равновесной термодинамики к процессу резания металлов ограничивается высокими положительными и отрицательными градиентами температуры, зависящими от режимов резания металла, т.е. неравновесностью процесса. Это вносит неопределенность в возможность проведения расчетов методами классической равновесной термодинамики.

Таким образом, на основании приведенных данных процесс резания металла при механической обработке следует отнести к закрытым термодинамическим системам, и наилучшим вариантом их рассмотрения является метод неравновесной термодинамики [13], применение которого весьма проблематично из-за отсутствия необходимых данных.

Пример выбора абразивных материалов

С экономической точки зрения выбор абразивных материалов целесообразно производить из наиболее дешёвых абразивов – корундов (Al_2O_3) и карбидов кремния (SiC).

Для выбора абразивных материалов для контактов Ni/SiC и Ni/ Al_2O_3 в условиях высокотемпературной эксплуатации и для изучения закономерностей протекания твердофазных реакций никеля с карбидом кремния и оксидом алюминия и связанных с ними изменений фазового состава структуры воспользуемся методикой, предложенной в работе [14].

Применение данной методики ограничивается следующими допущениями и предположениями:

- взаимной растворимостью и диапазоном гомогенности фаз можно пренебречь;
- сублимация и жидкие фазы в системе отсутствуют;
- тройные соединения в системе отсутствуют;
- реакции, в продуктах которых более двух веществ, исключаются из анализа как маловероятные.

Анализ литературных данных [15, 16] подтверждает правомерность применения этих предположений для тройных систем «никель–кремний–углерод» и «никель–алюминий–кислород» в диапазоне температур формирования и эксплуатации контактов (300...1300 К).

ВЫВОДЫ

1. На основании вышеизложенного можно считать целесообразным использование термодинамического подхода для выбора абразивного материала кругов при шлифовании покрытий.

2. Применение термодинамического метода для предсказания взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым металлом представляет весьма сложную задачу и требует использования предварительных допущений в расчетах и одинаковых условий температурно-временных режимов обработки нанесенных покрытий.

3. Для проведения термодинамических расчетов процесса резания в системе абразив–обрабатываемый материал система рассматривается закрытой, и соответствующие расчеты производятся до температуры 1300 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноиванов В.И. Организация и технология восстанов-

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

ления деталей машин. 2-е изд., доп. и перераб. / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин. М. : ГОСНИТИ, 2003. 488 с.

2. Корчак С.Н. Виды разрушения абразивных зерен при шлифовании и методы их определения / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, В.И. Ключко, П.П. Переверзев // Абразивные инструменты с полимерными и керамическими связующими: процессы получения и применение. Свердловск : Академия наук СССР, Уральский научный центр, 1982. С. 34–44.

3. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Новосибирск : Наука, 1986. 306 с.

4. Ангел Р. Коррозия и защита от коррозии : учеб. пособие / Р. Ангел ; перевод с английского А.Д. Калашникова. 2-е изд. Долгопрудный : Интеллект, 2014. 343 с.

5. Мержанов, А.Г. Процессы горения и взрыва в физико-химии и технологии неорганических материалов / А.Г. Мержанов // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 4. С. 323–345.

6. Итин В.И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск : ТГУ, 1989. 209 с.

7. Ухина А.В. Структурно-морфологические особенности формирования металл-алмазных композиций : автореф. дис. ... к.х.н. : 02.00.21 / Ухина Арина Викторовна. Новосибирск, 2019. 22 с.

8. Федоров С.В., Марков А.Б., Веснин В.С. Инновационное оборудование для формирования износостойких поверхностных сплавов на обрабатываемом инструменте: научные аспекты и коммерциализация // Инновации, 2015, № 8 (202). С. 72–75.

9. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции / Ю.Д. Третьяков. М. : Химия, 1978. 360 с.

10. Вест А. Химия твердого тела: Теория и приложения / А. Вест. Т. 1. М. : Мир, 1988. 556 с.

11. Справочник конструктора-инструментальщика / под ред. В.А. Гречишниковой и С.В. Кирсанова. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2006. 542 с.

12. Лопадзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лопадзе, Г.В. Бокучава. М. : Машиностроение, 1967. 112 с.

13. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Термодинамический анализ адаптации поверхностей трения при резании металлов // Вестник Уфимского гос. авиац.техн. университета, т. 12, № 4, 2009, С. 20–23.

14. Агеев О.А. Термодинамический анализ твердофазных взаимодействий в контактах Ni/SiC // Известия вузов. Электроника, № 2, 2005. С. 42–48.

15. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М. : Металлургия, 1976. 560 с.

16. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчеты в металлургии. М. : Металлургия, 1993. 304 с.

Информация об авторах

А. Л. Верещагин – д.х.н., профессор, профессор кафедры «Химической технологии энергосыщенных материалов и изделий» ФГБОУ ВО «Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ».

Н. С. Алексеев – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Техника и технологии машиностроения и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Рубцовский индустриальный институт (филиал) АлтГТУ».

Information about the authors

A.L. Vereshchagin - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemical Technology of Energy-Saturated Materials and Products, Biysk Technological Institute (branch), Polzunov Altai State Technical University.

N.S. Alekseev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering and Technology of Mechanical Engineering and Food Production, Rubtsovsky Industrial Institute, Polzunov Altai State Technical University.