

УДК 621.923.4:621.793.74



В.Г. Лебедев,
д.т.н., профессор
Одесский
национальный
политехнический
университет
e-mail:
wlebedev29@rambler.ru



Т.В.Чумаченко,
к.т.н., ст. преп.
Одесский
национальный
политехнический
университет
e-mail: chumachenko-
1981@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, НАПЫЛЕННЫХ МИНЕРАЛОКЕРАМИКОЙ Al_2O_3 и WC

В.Г. Лебедев, Т.В. Чумаченко.

Повышение надежности рабочих поверхностей деталей машин, напыленных минералокерамикой Al_2O_3 и WC. Изучены особенности формирования эксплуатационных характеристик напыленных покрытий, полученных на базе порошка Al_2O_3 и 30% WC. Предложена и изучена технология напыления, обеспечивающая достаточное сцепление напыленного слоя разной пористостью с основой, максимально уменьшающая его хрупкость, что увеличивает способность удерживать смазку и снижает риск появления трещин.

V.G. Lebedev, T.V. Chumachenko.

Improving the reliability of working surfaces of machine parts, sprayed with mineral ceramics Al_2O_3 and WC. The features of the formation of the performance of sprayed coatings obtained on the basis of Al_2O_3 powder and 30% WC. Proposed and studied spraying process, providing sufficient adhesion of deposited layers of different porosity to the substrate, as it reduces brittleness, which increases the ability to retain lubricant and reduces the risk of fractures.

Напыленные покрытия из 70% Al_2O_3 и 30% WC используются, как правило, для защиты деталей, работающих в тяжелых условиях. Они стойкие во многих агрессивных и окислительных средах, обеспечивая высокую степень защиты деталей при работе в условиях высоких температур. Кроме того, порошки на основе оксида алюминия имеют невысокую стоимость, что определяет экономическую эффективность их применения.

Целью данной работы является изучение особенностей формирования эксплуатационных характеристик напыленных покрытий, полученных на базе порошка Al_2O_3 и 30% WC.

Качество детали определяется совокупностью эксплуатационных свойств [1], формирующихся операциями нанесения покрытий и последующей финишной обработки, которая обеспечивает необходимую точность детали, микрогеометрию и физико-механические параметры поверхностного слоя.

Свойства, которыми должна обладать деталь и которые дают ей возможность выполнять своё служебное назначение в механизме или в машине в

течение оптимального срока, можно условно разделить на три группы:

- геометрические свойства, т.е. точность размеров и геометрической формы детали, определяющие принципиальную возможность сопряжения данной детали с другими деталями и возможность установки данной детали в машину или механизм;

- микрогеометрические свойства, т.е. шероховатость и волнистость поверхности, в значительной степени, определяющие эксплуатационные характеристики детали, в частности показатели надежности и долговечности;

- физические свойства, т.е. напряженное состояние, оказывающее большое влияние на эксплуатационные характеристики детали и на показатели надежности и долговечности.

Все три группы свойств детали, определяющие ее качество, формируются при механической обработке. Наиболее эффективным методом обработки деталей с покрытиями на заключительном этапе является шлифование [2,3,4,5].

Проблема обработки покрытия заключается не только в увеличении производительности, но и в обеспечении высокого качества обработанной поверхности.

При шлифовании деталей с покрытиями возникают следующие виды дефектов: отслоение покрытия от основного металла; трещины; вырывы части покрытия (вследствие налипания на абразивный инструмент). Основные и наиболее опасные виды дефектов – это дефекты, связанные с образованием трещин.

Поверхностные трещины – наиболее распространенный дефект при шлифовании деталей с покрытиями. Природа их образования связана с действием растягивающих напряжений в поверхностном слое покрытия в процессе шлифования. Шлифовочные трещины на поверхности материала могут располагаться перпендикулярно направлению движения режущих зерен или иметь характер замкнутых линий. При шлифовании керамических покрытий трещины возникают и распространяются по дефектам структуры.

Везде принимается тепловая теория остаточных напряжений и трещин в результате шлифования. Указанные дефекты в значительной степени затрудняют, а в ряде случаев делают невозможным формирование заданных физико-механических, а иногда и геометрических свойств детали, что приводит к значительному снижению уровня качества деталей в целом или даже к невозможности использовать ее в машине.

Шлифовочные дефекты приводят к неоправданным экономическим потерям при производстве и эксплуатации машин.

Таким образом, основной характеристикой физико-механического состояния поверхностного слоя покрытия, обработанного по технологии, обеспечивающей отсутствие трещинообразования, является уровень остаточных напряжений, сформировавшихся под воздействием термомеханических явлений с учетом наследственных напряжений.

При выборе между алмазным шлифованием керамики и кругами из КНБ учитывалось следующее:

1. Режущие способности кругов примерно одинаковы.
2. При шлифовании зерна вследствие низкой теплопроводности керамики подвергаются интенсивному нагреву.
3. Теплостойкость алмазных зерен составляет приблизительно 600 °С. Выше этой температуры начинается процесс графитизации алмаза. Теплостойкость зерен из КНБ доходит до 2000 °С, поэтому можно утверждать, что износ алмазных кругов будет значительно выше (что доказано практикой). Поэтому экономически обосновано керамику и соответственно напыленные керамические покрытия шлифовать кругами из КНБ.

Структура минералокерамического слоя отличается от обычной керамики. Это отличие вызвано самой сущностью процесса напыления и требованиями, которые предъявляются к напыленному слою. С одной стороны, необходимо обеспечить максимальную прочность сцепления слоя с основой, а с другой – необходимо обеспечить достаточную пористость слоя для хорошего удержания смазки. Получить такие свойства, используя один режим напыления, невозможно. Поэтому керамический слой напыляется в три прохода. Первый проход осуществляется при достаточно высокой силе тока (320 А), в результате чего происходит напыление с оплавлением. У такого керамического слоя пористость незначительна или приближается к нулю. Этот слой обеспечивает повышенную прочность сцепления (50 МПа) напыленной керамики с основой и служит подслоем. Второй слой напыляется при более низких значениях силы тока (280 А). При этом образуется умеренная пористость напыленного слоя (7 - 10%). Третий слой – при достаточно низких значениях силы тока (260 А), что обеспечивает повышенную пористость (15% - 18%).

Такая технология напыления, с одной стороны, обеспечивает достаточно прочное сцепление напыленного слоя с основой, а с другой – максимально уменьшает его хрупкость и увеличивает способность удерживать смазку. Поэтому напыленный керамический слой имеет переменный коэффициент теплопроводности от поверхности в глубину, причем на поверхности напыленного слоя коэффициент теплопроводности имеет минимальные значения, а в нижней части – максимальные.

Таким образом, структура напыленного слоя обладает разной пористостью по глубине и соответственно, разной теплопроводностью, теплоемкостью и плотностью.

В напыленном керамическом слое просматривается стохастическое распределение пор, из-за чего он проявляет существенно иную динамику накопления повреждений, чем металл. Доказывается [6], что в образцах со стохастической пористостью может отсутствовать фаза быстрого распространения магистральной трещины и резкого падения несущей способности, характерной для хрупкого разрушения. Это позволяет говорить о возможности квазивязкого разрушения хрупких материалов, обусловленного исключительно

структурой порового пространства. Исследовано деформационное поведение керамики с разной морфологией порового пространства. Обнаружен эффект механической неустойчивости, что наряду с чисто упругим поведением керамики и процессом накопления микрповреждений при активной деформации сжатием обеспечивает существенную деформацию пористой структуры без разрушения материала и соответственно более широкий спектр применения пористых керамических материалов.

На рис. 1, 2 представлены диаграммы напряжение-деформация керамики с разным уровнем пористости, где σ – возникающее напряжение, а ε – деформация. [43]

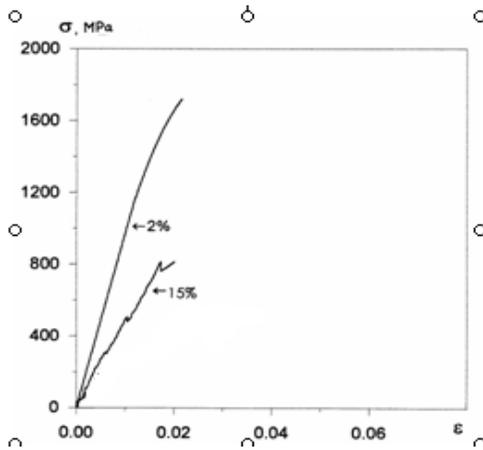


Рис. 1. Кривые деформирования керамики с разным уровнем пористости

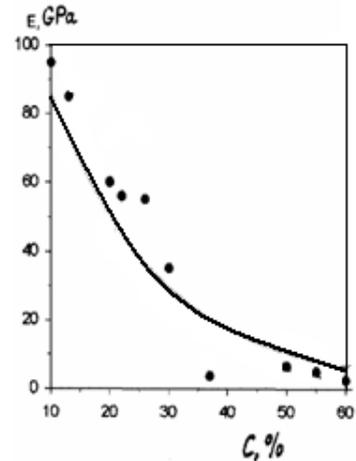


Рис. 2. Изменение модуля упругости с ростом пористости

Как видно из рис. 1, на диаграмме нагружения беспористой керамики (пористость менее 2 %) материал разрушается практически из упругой области. Увеличение пористости приводит к появлению множества микрповреждений в процессе деформирования, причем тем больше, чем больше величина пористости. Этот процесс проявляется на диаграмме нагружения в виде резких падений напряжения вследствие микрорастрескивания. При этом микротрещины останавливаются на порах и материал восстанавливает способность к упругому деформированию.

Процесс микрорезания сопровождается перемещением локальных объемов материала в поровое пространство, поэтому увеличение пористости приводит к появлению квазипластичности вследствие фактически дополнительного уплотнения (компактирования) материала.

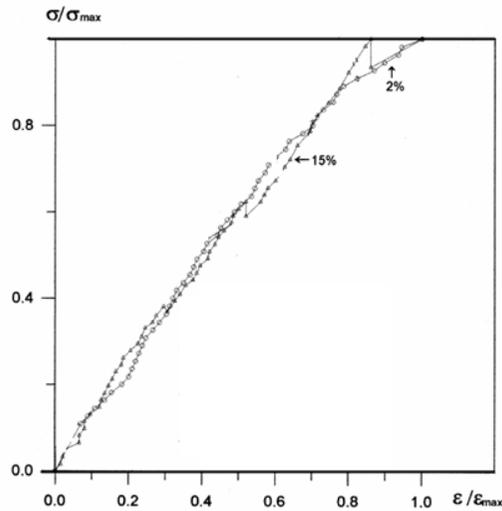


Рис. 3. Кривые деформирования керамики, построенные в относительных координатах

Таким образом, в материале наблюдается одновременно три механизма макродеформации: упругая деформация, характерная для компактного материала, микрорастрескивание с накоплением микроповреждений и перемещении локальных объемов материала в поровое пространство (рис. 3), где $\frac{\epsilon}{\epsilon_{\max}}$ относительная деформация, $\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$ относительное напряжение. При этом область появления микрорастрескивания, проявляющаяся на диаграмме нагружения в виде резких падений напряжений, с увеличением пористости смещается в область меньших относительных деформаций и становится более протяженной. Величина относительных деформаций, при которой напряжения достигают максимальных значений, линейно уменьшается с ростом пористости.

Способность к трансформационным превращениям в поле напряжений распространяющейся трещины сохраняется в керамике с пористостью не более 20 %.

После раскрытия трещины энергия в объеме поры релаксирует, стекая к вершинам трещины, и превращается в поверхностную. Из-за этого энергия системы понижается.

Экспериментальное исследование процесса образования трещин под действием усилия сжатия заключается в имитации действия временных напряжений сжатия на напыленный пористый керамический слой (пористость 10...15 %), которые возникают от действия сил $P_{\text{вед}}$, проводилась с помощью универсального гидравлического пресса модели ПСМ10 и индентора. При значениях напряжений, которые отвечают максимальным величинам, возникающим при шлифовании, трещин не возникало. Но при проведении сравни-

тельных экспериментов, когда действию напряжений подвергался напыленный керамический слой без пор, трещины возникали. Таким образом, экспериментально подтверждено, что трещины при шлифовании пористого керамического слоя возникают вследствие действия только тепловых остаточных напряжений. Это хорошо совпадает с исследованиями, которые были проведены в работах Н.А. Малининой, С.Н. Шариковой, С.П. Буяковой и др (РАН). На жестких образцах с помощью универсального гидравлического пресса нами получены напряжения образования трещин под действием усилия сжатия в зависимости от пористости и химического состава напыленного слоя.

Экспериментальные исследования графически представлены на рис. 4, откуда можно сделать вывод, что растрескивание сплошного керамического слоя начинается при напряжениях порядка 3 ГПа. Растрескивание напыленного керамического слоя с 15% пористостью начинается при напряжениях сжатия порядка 3,6 ГПа. Кроме того, напыленный модифицированный керамический слой (30%WC+70%Al₂O₃ с пористостью 15 % растрескивается еще при более высоких напряжениях порядка 3,9 ГПа. Указанные исследования при сопоставлении их с единичными и суммарными силами P_u , а также с напряжениями сжатия, подтверждают то, что трещины под действием этих напряжений образовываться не могут. Главным фактором образования трещин в напыленном керамическом слое являются растягивающие температурные напряжения шлифования.

Экспериментальное исследование величин остаточных напряжений при шлифовании напыленного керамического слоя кругом из КНБ заключалось в измерение величины остаточных напряжений методом травления занимает большой промежуток времени.

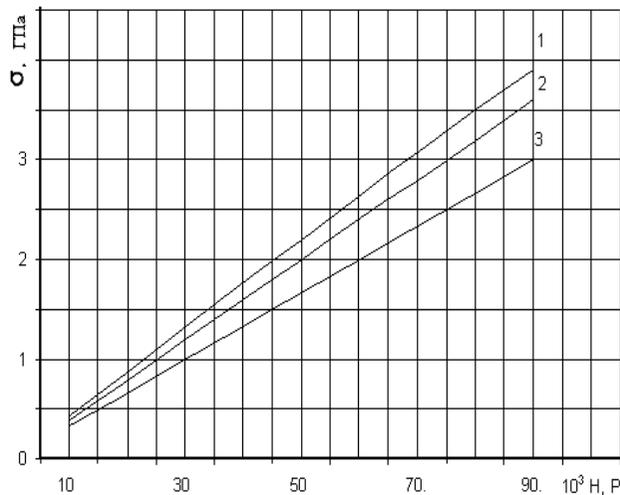


Рис. 4. Экспериментальные значения напряжений шлифуемого напыленного керамического слоя: 1 - слой без пор; 2 - слой с 15 %-й пористостью

Учитывая время на подготовку образца и на обработку полученных данных, надежные результаты можно получить только с одного образца в день (травление в среднем занимает 10 ч.). Поэтому измерения проводились не на всех сочетаниях с режимами обработки, как это было в случаях с силами и температурами, а только измерялись зависимости от глубины шлифования при всех остаточных фиксированных режимах. На каждой глубине обработки шлифовалось три образца, и после обработки определялось среднее арифметическое напряжение на поверхности образца.

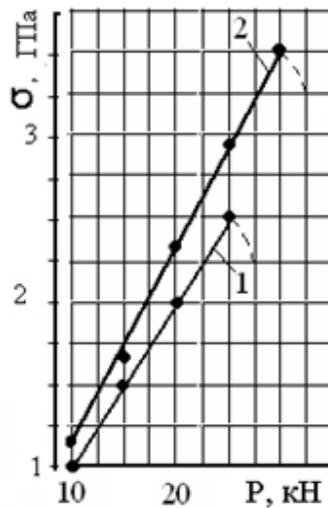


Рис. 5. Напряжения образования трещин под действием усилия сжатия в зависимости от пористости и химического состава (%) напыленного слоя на плоских образцах: 1- 15% пористости 30WC+70% Al_2O_3 ; 2 - 15% пористости 100 Al_2O_3 ; 3 - 0-2% пористости 100 Al_2O_3

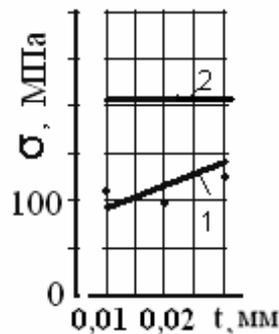


Рис.6. Экспериментальные значения остаточных (1 – $70Al_2O_3$ и 30WC) и допустимых (2 – $\sigma_{дон}$) напряжений на поверхности напыленного керамического слоя в зависимости от глубины обработки

Это также значительный объем экспериментов, который был выполнен для получения необходимой достоверности результатов. Таким же образом измерялись напряжения при шлифовании модифицированного напыленного слоя. Процент добавок определялся, исходя из теоретических расчетов по тем случаям, где имелось наибольшее снижение напряжений. Так, для модифицированного слоя добавка углерода составляла 30 %, добавка карбида титана и карбида вольфрама также составляла 30%. Результаты экспериментальных значений остаточных напряжений поверхностных керамических слоев показаны на рис. 6.

Распределение экспериментальных напряжений по глубине напыленных керамических слоев показано на рис. 7.

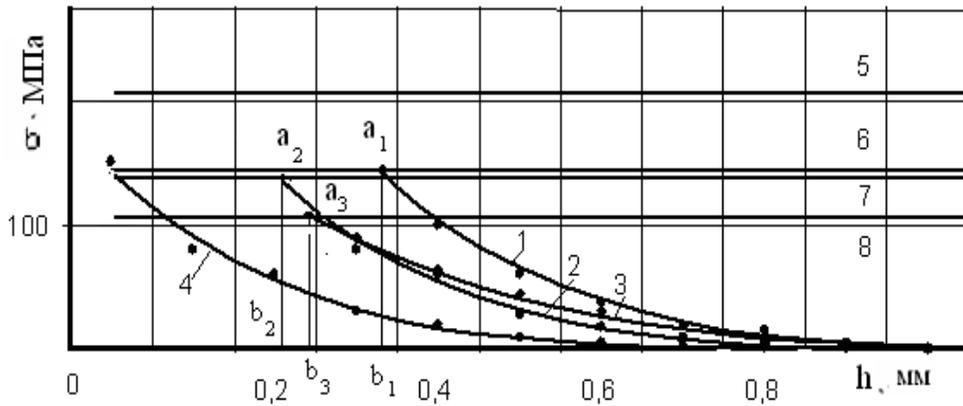


Рис. 7. Распределение экспериментальных напряжений по глубине напыленных керамических слоев (%) при шлифовании кругом из КНБ марки ЛО20100%СМ1К7.

1 – $100 \text{ Al}_2\text{O}_3$, 6 – $\sigma_{\text{дон}}$; 2 – $70 \text{ Al}_2\text{O}_3$ и 30TiC , 7 – $\sigma_{\text{дон}}$;
3 – $70 \text{ Al}_2\text{O}_3$ и 30C , 8 – $\sigma_{\text{дон}}$; 4 – $70 \text{ Al}_2\text{O}_3$ и 30WC , 5 – $\sigma_{\text{дон}}$.
Режимы шлифования: $S_{\text{нон}} = 10^{-3} \text{ м/ход}$, $t = 3 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $V_k = 30 \text{ м/с}$,
 $V_o = 0,16 \text{ м/с}$.

Из рисунка видно, что линии 4 и 5 не пересекаются, поэтому применяем более продуктивные режимы шлифования слоя из $70\text{Al}_2\text{O}_3$ и 30WC . Таким образом, можно утверждать, что модификация напыленного керамического слоя углеродом, карбидом титана и карбидом вольфрама приводит к значительному снижению уровня напряжения.

Выводы. При шлифовании напыленного керамического слоя из Al_2O_3 образуются трещины в поверхностном слое, которые являются неисправи-

мым видом брака, а для получения бездефектного слоя необходимо использовать непродуцируемые режимы шлифования.

При шлифовании напыленного керамического слоя модифицированного WC предел прочности повышается, а уровень напряжения снижается. Эти два фактора снижают вероятность появления трещин. Наилучшие результаты достигаются при модификации Al_2O_3 30WC. Это дает возможность применить более производительные режимы и увеличить производительность обработки на 70-80 %, получая бездефектный поверхностный слой.

Экспериментально подтверждено, что трещины при шлифовании напыленного керамического слоя возникают вследствие действия только температурных остаточных напряжений.

Література:

1. Сальников А. Н. Исследование закономерностей формирования остаточных макро-напряжений при шлифовании: автореф. дис. на получ. научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / А. Н. Сальников. – Саратов, 1976. –17 с.
2. Гордон Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи / Дж. Гордон – М. : Мир, 1980. – 160 с.
3. Готлиб Л.И. Жаростойкие и теплостойкие покрытия / Л.И. Готлиб. – Л.: Наука, 1969. – С. 286-288.
4. Гусев В. В. Использование керамических материалов в подшипниковых узлах / В. В. Гусев, А. В.Кондрашов // Современные металлорежущие системы машиностроения : материалы Всеукраинской студенческой конференции, Донецк: ДонГТУ, 2000. – 100 с.
5. Гукасян Л.Е. Напряжения и деформация в композиционных материалах при термодублировании / Л.Е. Гукасян, В.В. Белов, М.М. Рыбальченко // Физика и химия обработки материалов. – 1975. – № 4. – С. 114 - 117.
6. Калита В. И. Трехмерные капиллярно-пористые покрытия / В. И. Калита, В. Н.Соколов, В. А. Парамонов // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – № 4. – С. 55 – 61.
7. Кульков С. Н. Негуковское поведение пористого диоксида циркония при активной деформации сжатием / С. Н. Кульков, В.И. Калита, С.П. Буякова // Журн. техн. физики. – 2002. – Т. 72, № 3. – С. 38 –42.