

УДК 621.922:621.923

М.М. Яхутлов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова,  
З.Н. Деунежев, А.А. Гутов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕМ КОМПОЗИТЕ**

Методом численного моделирования исследованы температурные напряжения в алмазосодержащем композите на полимерном связующем. Показано, что максимальная интенсивность напряжений имеет место в приконтактном с зерном слое матрицы. Исследовано влияние на температурные напряжения в системе теплопроводности матрицы и материала покрытия зерна.

Ключевые слова: алмаз, полимерная матрица, математическая модель, температурное поле, температурные напряжения.

Алмазно-абразивные режущие инструменты на полимерных матрицах составляют до 70 % от общего потребления алмазного инструмента при обработке различных материалов, в основном металлов и сплавов, используемых в машиностроении. Алмазосодержащий слой инструмента представляет собой композиционный материал, имеющий матричную структуру, в которой в полимерной матрице, являющейся непрерывной фазой, равномерно распределены зерна алмазов.

Исследования и опыт эксплуатации алмазных инструментов показывают, что их работоспособность в значительной степени определяется прочностью удержания алмазного зерна в матрице при действии силовых и тепловых возмущений процесса эксплуатации. По данным различных авторов, от 30 до 95% зёрен выпадает из матрицы, не достигая значительного износа [1; 2]. Таким образом, прочность закрепления зёрен в матрице инструмента определяется процессами в системе «алмаз – матрица». Изучение процессов в этой системе при действии возмущений от процесса резания позволяет определить эффективные пути повышения работоспособности инструмента.

В настоящей работе изложены результаты исследования температурного поля и температурных напряжений в системе «зерно - полимерная матрица» инструментального алмазосодержащего композита. Наиболее целесообразным методом исследований этой системы является численное моделирование [3; 4]. Это связано с малыми размерами объекта и соответствующими сложностями экспериментальных исследований. В настоящей работе в качестве расчетной схемы принято единичное зерно эллипсоидной формы, помещенное в матрицу, так как исследования показали, что даже в инструментах с высокой концентрацией алмазов поля напряжений около зерен перекрываются незначительно, а эллипсоид вращения является наиболее приближенной к реальной формой зерна. Кроме того, вариацией размеров полуосей эллипсоида можно моделировать различные его пропорции. Для моделирования различных покрытий алмаза, широко применяемых в этих инструментах для улучшения алмазодержания [1; 2; 5], в расчетной схеме выделен переходный слой между алмазом и матрицей (рис. 1).

Тепловая нагрузка на систему определяется тепловыделением в зоне резания алмазным зерном и выражается удельным тепловым потоком, приложенным к части свободного контура зерна, непосредственно контактирующего с обрабатываемым материалом. Учитываются конвективные потери тепла в окружающую среду с соответствующим коэффициентом теплоотдачи.

Двухмерную задачу термоупругости решали с использованием метода конечных элементов, для чего разработаны специальные программы на алгоритмическом языке Turbo-C. Достоверность алгоритмов расчетов обоснована с помощью комплексных численных экспериментов и логических обоснований получаемых результатов. Необходимо от-

метить, что задача решается с учетом зависимости теплофизических свойств зерна, матрицы и переходного слоя (ниже в обозначениях теплофизических свойств этих элементов приняты индексы 1, 2 и 3 соответственно) от температуры. Такая постановка задачи необходима прежде всего в связи с известной существенной зависимостью теплофизических свойств алмаза от температуры [6].

В качестве базовых исходных данных в численных экспериментах были приняты параметры системы, характерные для условий работы алмазных шлифовальных кругов на бакелитовом связующем (таблица). Тепловая нагрузка на систему задавалась из условия соответствия температур в системе известным экспериментальным данным [2].

Таблица

Физические свойства элементов конструкции (при 20°C) [6; 7]

Материал	Плотность $\rho, \frac{кг}{м^3}$	Модуль упругости $E, ГПа$	Коэффициент Пуассона $\nu$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot град}$	Удельная теплоёмкость $c, \frac{Дж}{кг \cdot град}$	Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6, \frac{1}{град}$
Алмаз	3520	900	0,072	146,5	502	1,05
Бакелит	1300	4	0,30	0,18	1600	70

Проведено моделирование температурного поля в системе [8; 9]. На рис. 1 показано симметричное относительно вертикальной оси зерна распределение температуры в сечении по горизонтальной оси при различных коэффициентах теплопроводности материала матрицы  $\lambda_3$ . Отмечено, что из-за низкой теплопроводности матрицы при всех значениях  $\lambda_3$  алмазное зерно прогревается практически равномерно, а в приконтактном с зерном (переходном) слое матрицы наблюдается существенный градиент температуры.

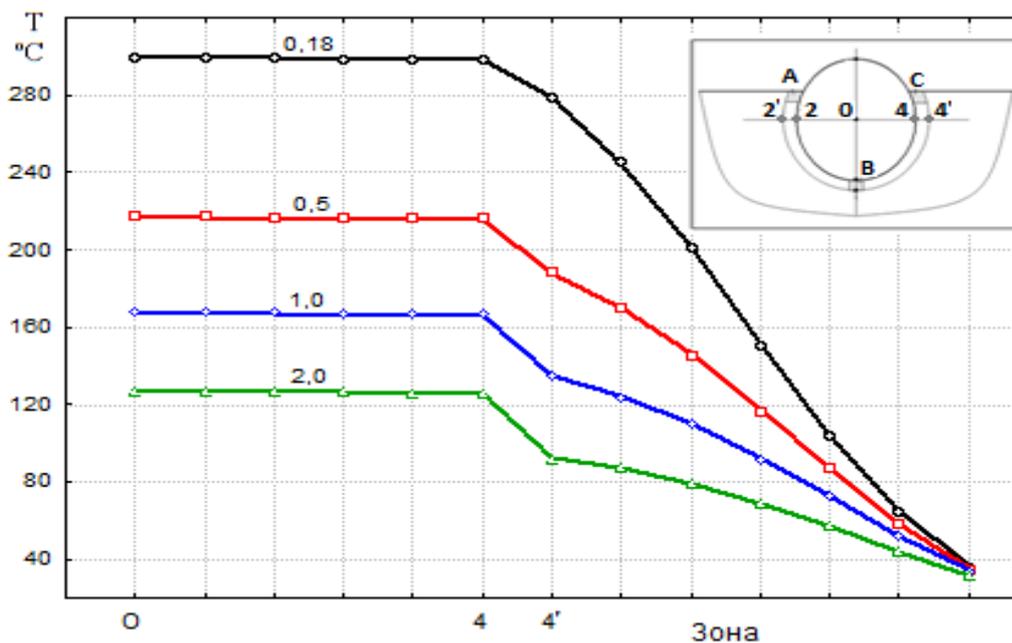


Рис. 1. Изменение температуры в сечении по горизонтальной оси зерна при различных коэффициентах теплопроводности матрицы

Исследованы температурные напряжения в системе «зерно-покрытие-матрица». На рис. 2 приведены компоненты напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  и интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в конструкции в сечении вдоль горизонтальной оси зерна. Анализ рисунка показывает, что максимальная интенсивность напряжений имеет место в переходном слое. При этом наблюдается резкое увеличение интенсивности напряжений при переходе от поверхности зерна в покрытие - с 38 до 88 МПа. Это объясняется существенным различием теплофизических свойств компонентов (таблица). Далее, по мере удаления от переходной зоны, напряжения плавно уменьшаются. Максимальная интенсивность напряжений в системе наблюдается в зонах концентрации напряжений А и С (рис. 1).

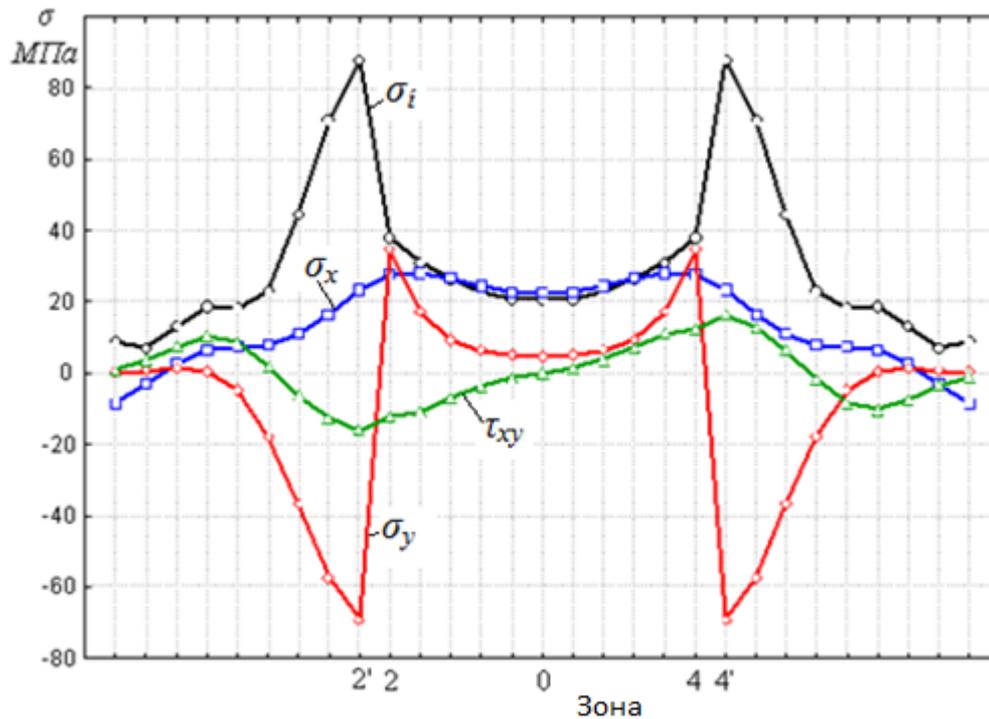


Рис. 2. Распределение температурных напряжений в сечении по горизонтальной оси зерна

Исследовано влияние на температурные напряжения в системе теплопроводности матрицы  $\lambda_3$ . На рис. 3 представлены зависимости  $\sigma_i$  в зоне В (рис. 1) от  $\lambda_3$  при использовании различных покрытий алмазного зерна. Отмечена общая тенденция к повышению интенсивности температурных напряжений в конструкции с уменьшением коэффициента теплопроводности связки  $\lambda_3$ . При этом зависимости носят нелинейный характер с возрастанием градиента  $\sigma_i$  при уменьшении  $\lambda_3$ , что особенно выражено при его низких значениях, характерных для полимерных матриц. Анализ результатов показывает, что уровень температурных напряжений в переходном слое существенно зависит от материала покрытия. Наименьший уровень интенсивности напряжений отмечен для покрытия из стекла. Далее следуют в порядке возрастания напряжений бакелит, свинец, медь, титан, никель (рис. 3).

Исследовано влияние коэффициентов теплового расширения переходного слоя ( $\alpha_2$ ) и матрицы ( $\alpha_3$ ) на интенсивность напряжений в переходном слое. Как следует из рис. 4, где представлена зависимость интенсивности напряжений в области В (рис. 1) от коэффициентов теплового расширения, напряжения растут с увеличением как  $\alpha_2$ , так и  $\alpha_3$ . При этом зависимость от  $\alpha_2$  выражена более существенно.

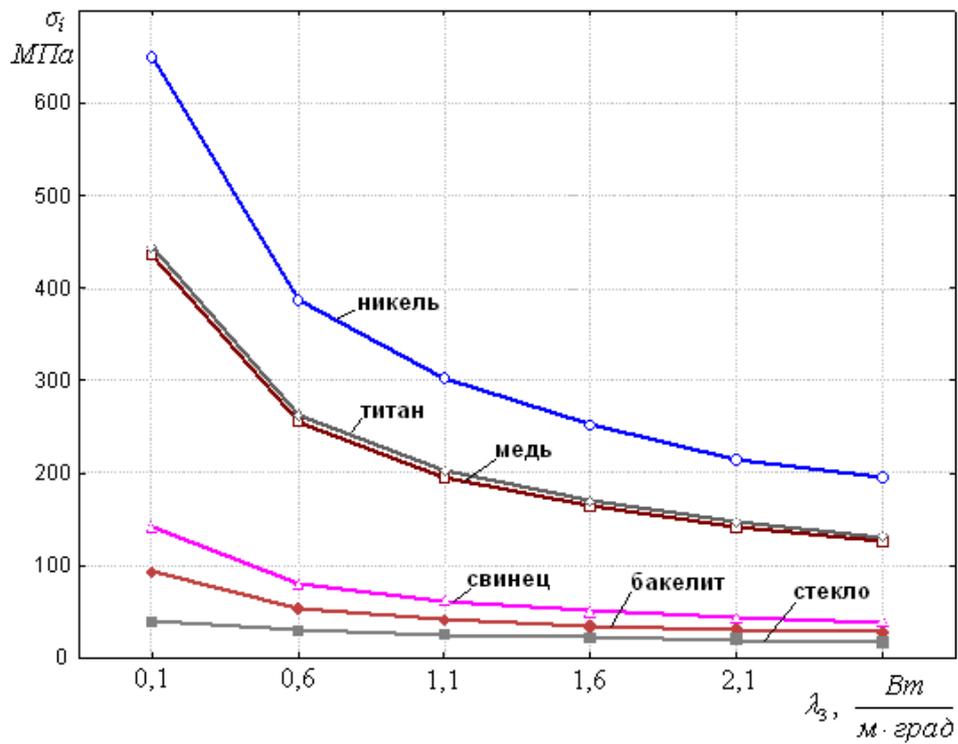


Рис. 3. Зависимость интенсивности температурных напряжений в зоне В (рис. 1) от теплопроводности матрицы при различных материалах покрытия зерна

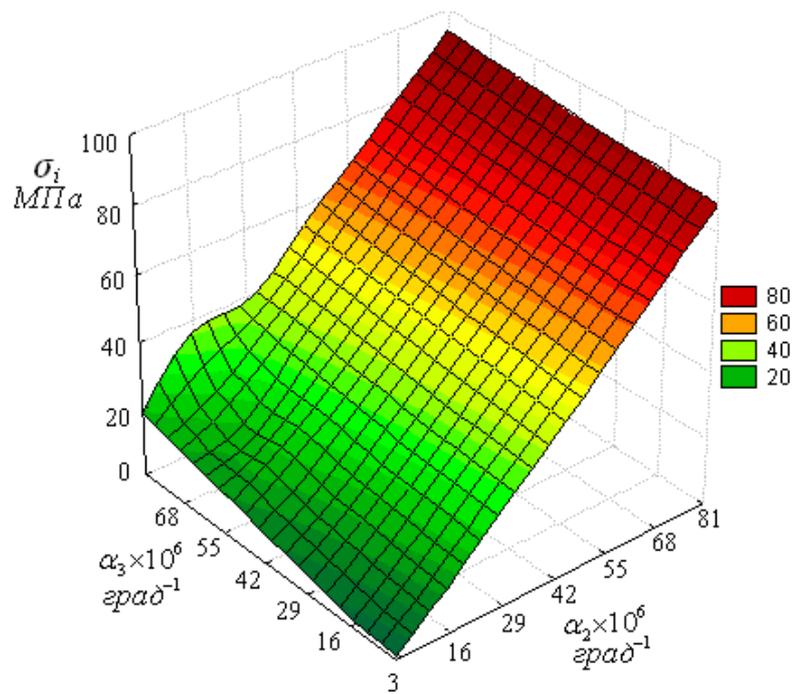


Рис. 4. Зависимость интенсивности напряжений в зоне В (рис. 1) от коэффициентов теплового расширения переходного слоя ( $\alpha_2$ ) и матрицы ( $\alpha_3$ )

Оптимальными являются значения  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , близкие к значению коэффициента теплового расширения алмаза  $\alpha_1 = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  (случай равенства коэффициентов теплового расширения всех элементов системы). Значению коэффициента теплового расширения бакелитовой матрицы  $\alpha_3 = 70 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  соответствуют оптимальные значения  $\alpha_2 = (1 \dots 1,5) 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ .

Разработанная модель и результаты численных экспериментов могут быть использованы для оптимизации конструкций, технологий изготовления и режимов эксплуатации алмазно-абразивных инструментов, в частности для разработки связующих, подбора состава и объёмной доли наполнителей, а также выбора покрытий для алмазных зёрен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструменты из сверхтвёрдых материалов / под ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.
2. Попов, С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
3. Яхутлов, М.М. Тепловой режим и напряженно-деформированное состояние системы зерно–матрица алмазного инструмента / М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, У.Д. Батыров, З.Ж. Беров, М.Р. Карданова // Сверхтвердые материалы. - 2011. № 5. - С. 88-100.
4. Яхутлов, М.М. Особенности математического моделирования алмазных инструментов / М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова // Изв. Кабардино-Балкар. гос. ун-та. – 2012. - Т. II. - №4. – С. 32-35.
5. Яхутлов, М.М. Направленное формирование межфазной границы алмаз-матрица с использованием нанопокровтий / М.М. Яхутлов, Б.С. Карамурзов, З.Ж. Беров, У.Д. Батыров, Р.М. Нартыжев // Изв. Кабардино-Балкар. гос. ун-та. – 2011. - Т. I. - №4. – С. 23-25.
6. Физические свойства алмазов: справочник / под ред. Н.В. Новикова. – Киев: Наукова думка, 1987. – 190 с.
7. Физические величины: справочник / под ред. Н.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Карданова, М.Р. Моделирование температурного поля в композиционном алмазосодержащем материале на органической матрице / М.Р. Карданова, М.Х. Лигидов, М.Х. Шхануков-Лафишев, М.М. Яхутлов // Пластические массы. -2010. -№5. –С. 34-38.
9. Яхутлов, М.М. Исследование тепловой нагрузки на алмазные шлифовальные круги / М.М. Яхутлов, М.Х. Лигидов, У.Д. Батыров, М.Р. Карданова, З.Н. Деунезев // Изв. Кабардино-Балкар. гос. ун-та. – 2013. - Т. III. - № 6.

Материал поступил в редколлегию 18.07.14.