

**М. М. Яхутлов, Б. С. Карамурзов, У. Д. Батыров,
М. М. Ошхунов, М. Р. Карданова** (г. Нальчик, Россия)

Напряженно-деформированное состояние системы зерно—матрица алмазного инструмента при силовых возмущениях

Численным моделированием оценено напряженно-деформированное состояние системы зерно—матрица алмазного инструмента на твердосплавной матрице. Показано, что наиболее напряженной частью связки является контактный с алмазом (переходный) слой. Получены закономерности изменения напряжений в этой области при изменении направления силы резания, свойств матрицы и переходного слоя. Проведен анализ напряжений в зависимости от степени погружения зерна в матрицу, для различных форм зерна и коэффициентов Пуассона связки определены критические параметры погружения.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, алмазный инструмент, силовые возмущения, твердосплавная матрица, численное моделирование, форма зерна, коэффициент Пуассона.*

Известно, что прочность и надежность алмазоудержания и работоспособность алмазного инструмента в целом в значительной степени определяются природой контактного слоя между алмазом и матрицей (связкой) и процессами, происходящими в нем в процессе эксплуатации. Раскрытие физических явлений, происходящих в системе алмаз—матрица при эксплуатации инструмента и, прежде всего, исследование напряженно-деформированного состояния позволяет определить эффективные пути повышения работоспособности алмазного инструмента.

Наиболее эффективным методом исследования напряженно-деформированного состояния этой системы является расчетное моделирование. Это связано с малыми размерами объекта и соответствующими сложностями экспериментальных исследований. Данная статья посвящена численному моделированию напряженно-деформированного состояния системы зерно—связка алмазного инструмента при действии усилия резания.

В известных работах, посвященных данной проблеме [1—4], рассмотрены частные случаи такого анализа или результаты, полученные на основе упрощенных моделей системы.

В настоящей работе в качестве расчетной схемы принято единичное зерно эллипсоидной формы, помещенное в матрицу (рис. 1), так как исследования [5] показали, что даже в инструментах с высокой концентрацией алмазов поля напряжений около зерен перекрываются незначительно. Что касается выбора формы зерна, эллипсоид вращения является наиболее приближенной к реальной формой зерна [6]. Кроме того, вариацией размеров полуосей эллипсоида можно моделировать различные его пропорции, в том числе, сферическую форму зерна.

Двухмерную задачу теории упругости решали с использованием метода конечных элементов. В расчетной схеме, наряду с алмазом и матрицей, выде-

лен переходный слой между ними. Таким образом, расчетная схема состоит из трех фрагментов, изготовленных из изотропных материалов с соответствующими физическими свойствами — алмаза, матрицы и переходного слоя. Расчетная схема задана следующими параметрами: Δ_k — толщина конструкции; a, b — полуоси алмаза; δ — толщина переходного слоя; h_k — глубина погружения центра зерна алмаза в матрицу.

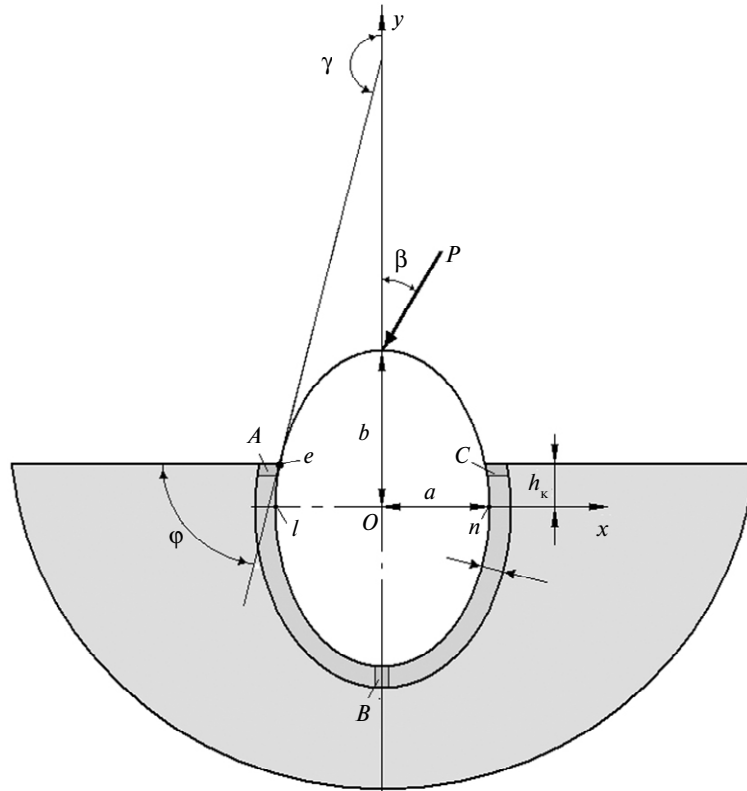


Рис. 1. Расчетная схема модели напряженно-деформированного состояния системы зерно—связка алмазного инструмента при действии усилия резания.

Алгоритм решения задачи реализован в виде программы на алгоритмическом языке Turbo-C. Проведено исследование и обоснование достоверности и точности получаемых результатов, а также разработаны рекомендации по выбору методических параметров расчета. Оценку точности получаемого решения проводили с использованием свойств симметрии исследуемой конструкции и на основе анализа реакций на неподвижных узлах, расположенных на криволинейном контуре матрицы (см. рис. 1). Проведена также оценка точности решения при различном числе конечных элементов. Численные эксперименты показали монотонную сходимость результатов при различном числе треугольных конечных элементов, на которые разбивали конструкцию. При этом отмечено удовлетворительное совпадение результатов даже в зонах концентрации напряжений, каковыми являются области сопряжения защемленной поверхности зерна с его свободной поверхностью.

В качестве базовых исходных данных при исследованиях были приняты параметры системы (табл. 1 и 2), характерные для условий работы инструментов на металлической связке, изготавливаемых методами порошковой

металлургии — правящих карандашей, камнеобрабатывающих и буровых инструментов. В частности, угол β определяли по данным экспериментальных исследований [7] осевой и тангенциальной составляющих усилий при резании единичным алмазным зерном различных горных пород (мрамора, известняка, кварцевого альбитофира, роговика магнетитового, гранита и др.). Свойства матрицы и переходного слоя в общем случае приняты одинаковыми и соответствующими свойствам серийной матрицы M50, которые рассчитывали исходя из свойств компонентов матрицы [8] и их объёмных долей по методике определения физических свойств композиционных материалов [9].

Таблица 1. Параметры модели

Размеры, мм					Нагрузка	
a	b	Δ_k	h	δ	P , Н	β , град
1,0	1,5	2,0	0,5	0,05	70	35

Таблица 2. Свойства элементов конструкции

Материал	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν
Алмаз [10, 11]	3,52	900	0,072
Матрица	11,5	250	0,30

На рис. 2 представлены закономерности изменения напряжений в контактом с зерном слое матрицы, а на рис. 3 — в сечении по малой оси зерна. Как видно из рисунков, левая относительно оси симметрии исследуемой системы часть является наиболее напряженной. В этой области компоненты напряжений имеют преимущественно отрицательный знак, растягивающие напряжения характерны для другой части системы. При этом отмечена общая тенденция возрастания напряжений по мере приближения к границе зерно—матрица, а максимальная интенсивность напряжений приходится на приконтактную область со стороны алмаза.

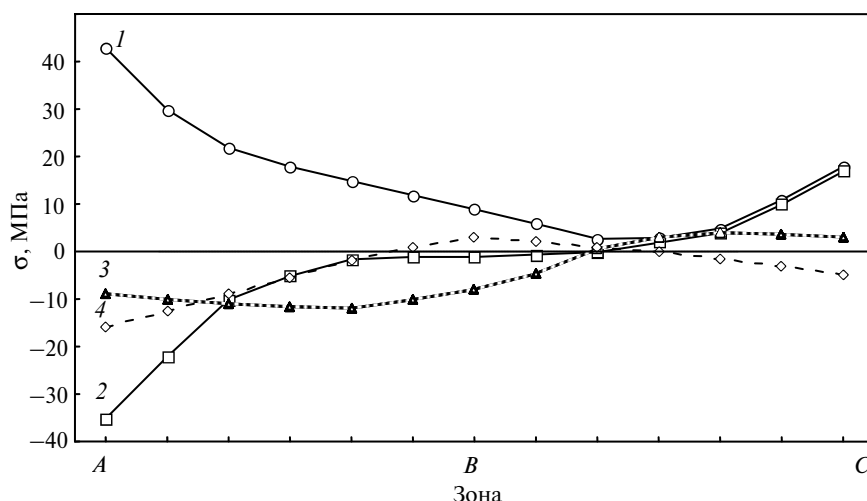


Рис. 2. Изменение напряжений в переходном слое ($P = 70$ Н, $\beta = 35^\circ$): σ_i (1), σ_x (2), σ_y (3), τ_{xy} (4).

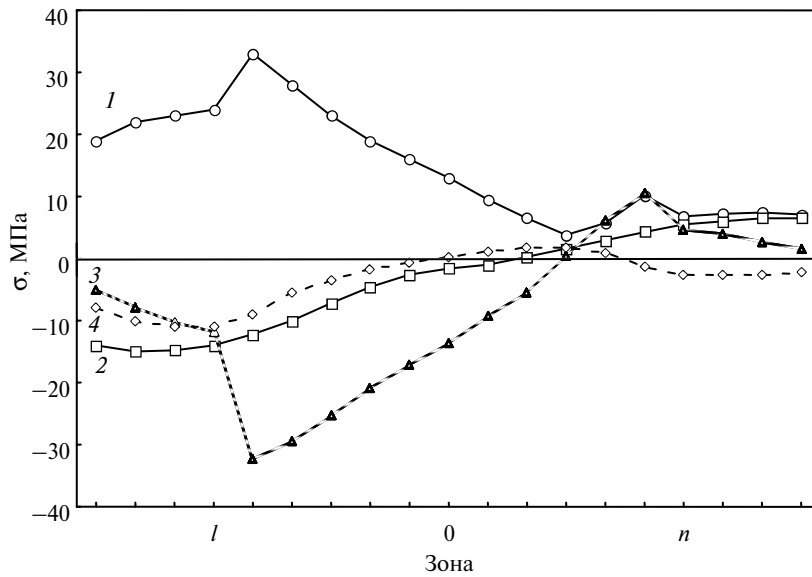


Рис. 3. Распределение напряжений в сечении по малой оси зерна: σ_z (1), σ_x (2), σ_y (3), τ_{xy} (4).

Напряжения в контактной области со стороны матрицы увеличиваются по абсолютной величине по мере приближения к областям A и C , в зоне концентрации напряжений. На рис. 4 представлена зависимость интенсивности напряжений σ_z в контактном слое от направления силы резания, которое в реальных условиях процесса резания может определяться обрабатываемым материалом, режимом и условиями резания или ориентацией зерна в связке. Как видно, при значениях угла β равных 0 и 90° имеет место симметричная картина интенсивности напряжений. В остальных случаях наиболее напряженным является участок AC контактной области. При этом по мере увеличения β значение σ_z в зоне A возрастает.

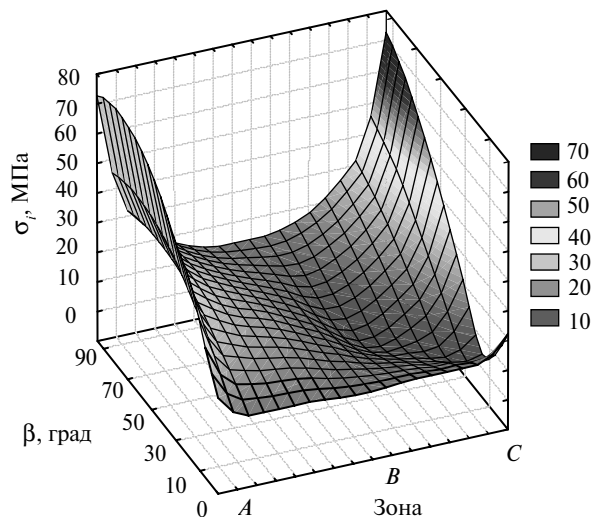


Рис. 4. Зависимость интенсивности напряжений в переходном слое от направления силы резания.

Расчетный анализ влияния механических свойств системы на напряженно-деформированное состояние показал, что система наиболее чувствительна к изменению модуля упругости связки и переходного слоя. Изменение коэффициента Пуассона несущественно меняет картину напряженно-деформированного состояния системы. Увеличение модуля упругости приводит к росту напряжений в контактной области, причем эта закономерность более выражена по мере приближения к областям *A* и *C*. В табл. 3 приведены результаты расчетов интенсивности напряжений в этих зонах при различных значениях модуля упругости связки E_3 и переходного слоя E_2 . В верхней части таблицы приведены результаты, полученные для случая, когда свойства переходного слоя и матрицы одинаковы, а в нижней — когда $E_3 = 250$ ГПа и изменялись значения E_2 .

Таблица 3. Зависимость напряжений в зонах *A* и *C* от модуля упругости связки E_3 и переходного слоя E_2

Зона	Интенсивность напряжений σ_i , МПа			
	$E_2 = E_3$, ГПа			
	10	100	250	400
<i>A</i>	34	38	43	57
<i>C</i>	11	15	18	23
	E_2 , ГПа ($E_3 = 250$ ГПа)			
	10	100	250	400
	<i>A</i>	31	38	43
<i>C</i>	14	16	18	21

Расчеты для случая $E_2 = E_3$ показали, что перемещения и соответственно жесткость системы зависят от модуля упругости нелинейно. В табл. 4 приведены результаты расчетов перемещений U и V вершины зерна (точки приложения силы) соответственно по осям x и y .

Таблица 4. Зависимость перемещений точки приложения силы от модуля упругости связки E_3 и переходного слоя E_2

$E_2 = E_3$, ГПа	50	150	250	350	450
$U \cdot 10^7$, м	-11,43	-4,62	-3,23	-2,63	-2,29
$V \cdot 10^7$, м	-8,45	-3,34	-2,35	-1,87	-1,62

Проведен анализ напряжений на линии сопряжения защемленной поверхности зерна с его свободной поверхностью, являющейся линией смены типа граничных условий. Известно [12], что вблизи таких линий поля напряжений могут обращаться в бесконечность. При подходе к точке e (см. рис. 1) напряжения имеют вид [13]

$$\sigma_{ij} \approx \rho^{-(1-\eta)}; \quad \rho \rightarrow 0,$$

где ρ — расстояние до точки e ; η — корень характеристического уравнения

$$(3 - 4\nu) \cos^2 \eta \varphi - \eta \sin^2 \eta \varphi + (1 - 2\nu)^2 = 0. \quad (1)$$

Очевидно, что $\eta = 1$ является пороговым значением. При $\eta < 1$ напряжения в точке e бесконечно возрастают, а при $\eta > 1$ они обращаются в ноль.

Как следует из (1), показатель η и, соответственно, напряжения в точке e , зависят от коэффициента Пуассона ν материала связки, прилегающей к зерну, и угла клина φ , который зависит от степени погружения зерна в связку. Для $\eta = 1$ из (1) получаем

$$\varphi_{кр} = \arccos \sqrt{\nu}.$$

Введем безразмерный геометрический параметр

$$\Delta h = \frac{b + h_k}{2b},$$

характеризующий степень погружения зерна в матрицу. Параметр Δh меняется от единицы (зерно полностью погружено в связку) до нуля (зерно лежит на поверхности связки).

Из уравнения эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

для точки e запишем

$$x(h) = a \sqrt{1 - \frac{h_e^2}{b^2}}.$$

Тогда

$$x'(h) = -\frac{a}{b} \frac{h_k}{\sqrt{b^2 - h_k^2}} = \operatorname{tg} \beta.$$

Заметим, что

$$\operatorname{tg}(\pi - \beta) = \operatorname{ctg} \varphi = \frac{a}{b} \frac{h_k}{\sqrt{b^2 + h_k^2}}$$

и

$$\operatorname{ctg} \varphi = \sqrt{\frac{\nu}{1 - \nu}}.$$

Отсюда находим

$$h_k = \frac{b^2 \operatorname{ctg} \varphi}{\sqrt{a^2 + b^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi}}. \quad (2)$$

С учетом (2) критическое значение безразмерного параметра Δh может быть записано в виде

$$\Delta h_{кр} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\operatorname{ctg} \varphi}{\sqrt{(a/b)^2 + \operatorname{ctg}^2 \varphi}} \right].$$

В табл. 5 приведены критические углы и соответствующие им параметры погружения зерна в связку для различных форм зерна и значений коэффициентов Пуассона материала матрицы. Как видно из таблицы, с увеличением коэффициента Пуассона уменьшаются критические (максимально допустимые) значения угла клина $\varphi_{кр}$, и, соответственно, увеличиваются критические (минимально допустимые) значения параметра погружения зерна в связку $\Delta h_{кр}$. При этом для заданного материала связки с увеличением отношения a/b уменьшается величина $\Delta h_{кр}$. Отметим, что аналогичный анализ проведен в [4] для зерна сферической формы.

Таблица 5. Критические углы и параметры погружения зерна в связку

ν	Фкр, рад	$\Delta h_{кр}$								
		a/b								
		2/10	4/10	6/10	8/10	10/10	10/8	10/6	10/4	10/2
0,00	1,571	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
0,05	1,345	0,877	0,749	0,679	0,638	0,612	0,590	0,568	0,546	0,523
0,10	1,249	0,929	0,820	0,743	0,692	0,658	0,629	0,598	0,566	0,533
0,15	1,173	0,951	0,862	0,787	0,732	0,694	0,659	0,622	0,583	0,542
0,20	1,107	0,964	0,890	0,820	0,765	0,724	0,686	0,644	0,598	0,550
0,25	1,047	0,972	0,911	0,847	0,793	0,750	0,710	0,664	0,613	0,557
0,30	0,991	0,978	0,927	0,869	0,817	0,774	0,732	0,683	0,627	0,565
0,35	0,938	0,982	0,939	0,887	0,838	0,796	0,753	0,701	0,641	0,573
0,40	0,886	0,986	0,949	0,903	0,857	0,815	0,773	0,720	0,655	0,581
0,45	0,835	0,988	0,957	0,917	0,875	0,835	0,793	0,738	0,670	0,589
0,50	0,785	0,990	0,964	0,929	0,890	0,854	0,812	0,757	0,686	0,598

На рис. 5 показаны компоненты и интенсивность напряжений σ_i в зоне A (см. рис. 1) для исходной формы зерна. На этом же рисунке приведены закономерности изменения интенсивности напряжений для двух других случаев: зерна в форме эллипсоида вращения с горизонтальным расположением большей оси σ_{i32} и шара равного с эллипсоидом объема $\sigma_{iш}$. Заметим, что для исходной конструкции (см. табл. 1) $\Delta h_{кр} = 0,67$ и при значениях $\Delta h < \Delta h_{кр}$ напряжения существенно возрастают. Это является еще одним косвенным свидетельством достоверности алгоритмов расчета.

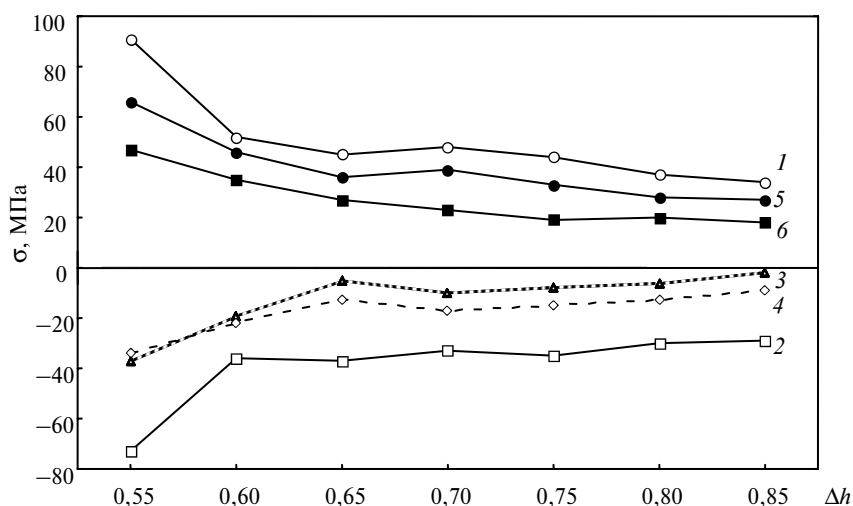


Рис. 5. Зависимость напряжений в зоне A от степени погружения зерна в связку: σ_i (1), σ_x (2), σ_y (3), τ_{xy} (4), $\sigma_{iш}$ (5), σ_{i32} (6).

Разработанная модель дает картину напряженно-деформированного состояния в системе алмазное зерно—переходный слой—матрица при силовых воздействиях. Модель и полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкций, технологий изготовления и режимов эксплуа-

тации алмазно-абразивных инструментов, в частности, при разработке связок и для направленного формирования контактного с зерном слоя матрицы в процессе изготовления инструмента.

1. *Лавриненко В. И., Кулаковский В. Н., Ломашевская Н. В. и др.* Напряженное состояние в зоне взаимодействия зерна со связкой круга // *Сверхтв. материалы*. — 1995. — № 4 — С. 46—49.
2. *Лавриненко В. И., Кулаковский В. Н.* Напряжения, возникающие в зоне контакта зерно—связка с учетом наклона зерен // *Там же*. — 2002. — № 4 — С. 71—75.
3. *Петасюк О. У.* О поведении алмазного зерна в связке под действием нагрузки // *Исследование и применение сверхтвердых и тугоплавких материалов*. — Киев: ИСМ АН УССР, 1981. — С. 106—110.
4. *Олейников А. Б., Сенченков И. К., Рубцова И. Г.* Влияние напряженно-деформированного состояния контакта зерно—связка на работоспособность кругов с режущим слоем из АЛШЛ // *Сверхтв. материалы*. — 1987. — № 5. — С. 45—49.
5. *Yang Dong Y., Seired Ali A.* Model for predicting residual stresses in metal cutting // *Proc. Jap. Int. Tribology Conf., Nagoya, Japan, 29 Oct.—1 Nov., 1990*. — Tokyo, 1990. — Vol. I. — P. 439—444.
6. *Лавриненко В. И., Шепелев А. А., Петасюк Г. А.* Модели формы зерен СТМ // *Сверхтв. материалы*. — 1994. — № 5—6. — С. 18—21.
7. *Исаев М. И., Пономарев П. В.* Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. — М.: Недра, 1975. — 288 с.
8. *Физические величины*: Справ. / Под ред. Н. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
9. *Композиционные материалы*: Справ. / Под ред. Д. И. Карпиноса. — Киев: Наук. думка, 1985. — 592 с.
10. *Физические свойства алмаза*: Справ. / Под ред. Н. В. Новикова. — Киев: Наук. думка, 1987. — 190 с.
11. *Бакуль В. Н., Захаренко И. П., Кунькин Я. А., Мильштейн М. З.* Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / Под общ. ред. В. Н. Бакуля. — Киев: Техника, 1971. — 208 с.
12. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. — М.: Наука, 1979. — 744 с.
13. *Уфлянд Я. С.* Интегральные преобразования в задачах теории упругости. — Л.: Наука, 1967. — 402 с.

Кабардино-Балкарский государственный ун-т

Поступила 16.09.09