

**В. А. ФЕДОРОВИЧ**, д-р техн. наук, **Є. О. БАБЕНКО**,  
**И. Н. ПЫЖОВ**, д-р техн. наук, **Д. О. ФЕДОРЕНКО**,  
**Д. В. РОМАШОВ**, **А. М. МАЛИНЯК**, Харьков, Украина

## **РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ СТМ**

Досліджений процес різання лезовим інструментом із надтвердих матеріалів (НТМ) шляхом 3D моделювання напружено-деформованого стану (НДС) зони різання. Здійснена кількісна оцінка напруг, що виникають в системі «різець–металофаза–заготовка», залежно від вмісту, розмірів і фізико-механічних властивостей металевих включень. Встановлений вплив якісного і кількісного складу металофази в ріжучій кромці лезового інструменту із НТМ на її цілісність в процесі експлуатації, визначені найбільш раціональні властивості алмазного різця, які дозволяють значно підвищити його надійність.

Исследован процесс резания лезвийным инструментом из сверхтвердых материалов (СТМ) с использованием 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны резания. Проведена количественная оценка напряжений, возникающих в системе «резец–металлофаза–заготовка», в зависимости от содержания, размеров и физико-механических свойств металлических включений. Установлено влияние качественного и количественного состава металлофазы в режущей кромке лезвийного инструмента из СТМ на ее целостность в процессе эксплуатации, определены наиболее рациональные свойства алмазного резца, позволяющие значительно повысить его надежность.

The process of cutting with tools of super hard materials (SHM) with the use of 3D modeling of stress-strain state of cutting area have been researched. Quantitative estimation of the stresses arising in the «bloom–chisel–metaphase» system, depending on the content, size and physical-mechanical properties of metallic inclusions have been conducted. The influence of qualitative and quantitative composition of metaphase at the cutting edge of blade tools from SHM to its integrity during the exploitation, determinate the most rational properties of the diamond cutter to significantly increase its reliability.

*1. Актуальность темы.* Современное производство предъявляет к инструментам и инструментальным материалам высокие требования по обеспечению работоспособности в условиях больших скоростей резания и динамических нагрузок, интенсивного теплового и химического взаимодействия с обрабатываемыми материалами. Наиболее полно таким требованиям отвечают инструментальные сверхтвердые материалы, в.ч. алмазы, которые, сочетают высокую твердость и прочность. На современном этапе развития науки и техники поликристаллические сверхтвердые материалы не только продолжают играть важную роль, но и находят новые области применения [1, 2, 3].

В то же время широкое применение лезвийного инструмента из СТМ сдерживается относительно невысокой надежностью при его эксплуатации. Так по данным института сверхтвёрдых материалов надежность инструмента из СТМ не превышает 46÷50 % [4], что связано особенностями синтеза СТМ и с отсутствием научно обоснованных принципов, позволяющих осуществлять выбор рациональных режимов резания и заточки алмазного лезвийного инструмента.

Учитывая вышеизложенное, актуальным является определение технологических параметров обработки на всем жизненном цикле лезвийного инструмента из СТМ: от первоначального изготовления до повторной заточки с учетом факторов, негативно влияющих на надежность инструмента, производительность процесса резания, что и составляет предмет данных исследований.

2. *Анализ последних исследований и публикаций.* Разработке путей повышения надежности лезвийного инструмента из СТМ посвящены работы Л. Н. Девина, А. Г. Найденко, В. Н. Нечипоренко [5–7], в которых приведены результаты изучения влияния режимов резания на надежность процесса точения алмазными резцами при точении алюминиевых сплавов и доказана эффективность метода акустической эмиссии для оценки работоспособности резцов.

Вопросы 3D-моделирования процессов лезвийной обработки рассмотрены в работах [8–10], авторами которых выполнен сравнительный анализ особенностей процесса резания, обоснована необходимость создания обобщающей модели этого процесса, а также представлена методология прогнозирующего моделирования процессов стружкообразования при резании.

В то же время изучению влияния качественных и количественных характеристик резцов из СТМ на их надежность при эксплуатации посвящено ограниченное число работ, данные которых носят несистемный характер и зачастую противоречивы.

3. *Цель и задачи исследований.* Целью работы является повышение эффективности резания алмазным лезвийным инструментом за счет научно обоснованного выбора характеристик резцов из СТМ, а также оптимизации режимов резания и заточки инструмента, повышающих его надежность и долговечность при эксплуатации. При этом основной задачей исследований являлось определение влияния характеристик лезвийного инструмента из СТМ на НДС систем типа «резец–металлофаза–заготовка» на основе прогнозного 3D-моделирования их НДС при наличии и отсутствии ударных нагрузок.

4. *Основные материалы исследования.* Для достижения поставленной цели выполнены теоретико-экспериментальные исследования процесса лезвийной обработки инструментом из СТМ с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Моделирование

процесса резания проводилось с применением программного пакета SOLIDWorks; была создана трехмерная модель резца из СТМ, которая представляет собой режущий клин призматической формы с размером поперечного сечения  $100 \times 100$  мкм и углом в плане  $\varphi = 45^\circ$ ; углы резания составляли  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ . Модель рассматривалась как упругое тело с включениями на режущей кромке двух металлофаз призматической формы, расположенных на расстоянии 30 мкм (рис.1а). Материал режущего клина – АСПК с пределом прочности на изгиб 4 ГПа. После импортирования созданной 3D модели в программу COSMOSWorks была сформирована сетка конечных элементов и произведено ее сгущение в области контакта режущей кромки и расположения включений металлофазы (рис. 1б).

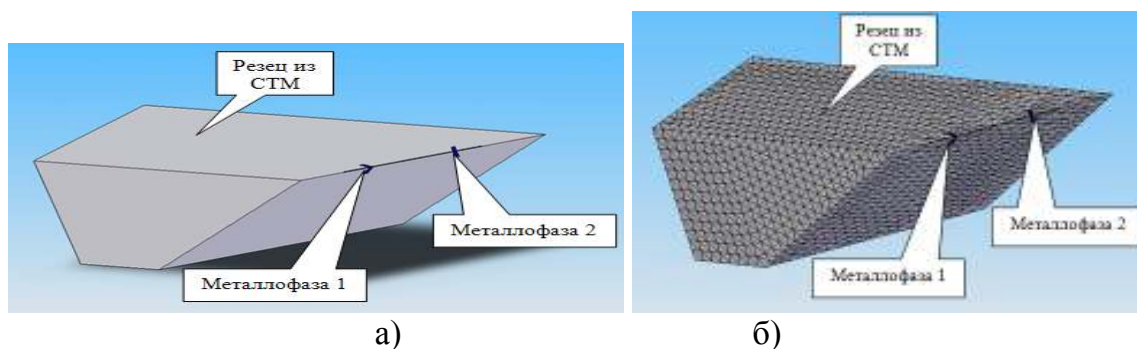


Рисунок 1 – Исходная 3D модель системы «резец-металлофаза» для расчета НДС в режущей кромке лезвийного инструмента из СТМ

В качестве металлофазы, преобладающей в синтетическом поликристаллическом алмазе (АСПК), были рассмотрены медь, никель, железо и молибден, физико-механические свойства которых представлены в табл.1.

Модель нагружалась нормальной силой к режущей кромке резца величиной 1 Н с одновременным приложением высоких температур в пределах  $400 \div 800$  оС и ограничением степеней свободы режущего клина. В результате расчета 3D НДС системы «резец–металлофаза» были получены диаграммы, которые наглядно иллюстрируют поля их распределения (рис. 2).

Анализ результатов расчета свидетельствует о том, что при одинаковых температурных условиях в режущей кромке увеличение напряжений происходит в ряду металлофаз с преимущественным содержанием следующих материалов: железо < молибден < никель < медь.

Исследования влияния температурного фактора показали, что в отличие от традиционного мнения, где принято считать, что силовой фактор приводит к сколу режущей кромки, наши исследования показали, что температурный фактор также оказывает существенное влияние на разрушение режущей кромки лезвийного инструмента из СТМ в процессе его эксплуатации.

Комплексный анализ влияния свойств металлофазы кромки на 3D НДС изучаемой системы показал, что эквивалентные напряжения повышаются при увеличении коэффициента теплового расширения (КТР) и уменьшении показателей деформационных свойств металлофазы, таких как предел прочности при растяжении и предел текучести, характеризующие соответственно временное сопротивление разрушению и предельные напряжения деформации.

Таблица 1 – Физико-механические свойства металлов, преобладающих в составе металлофазы

Свойства	Преобладающий материал металлофазы			
	медь	никель	молибден	железо
Модуль упругости $E \cdot 10^{11}$ , Па	1,1	2,1	3,2	1,2
Коэффициент Пуассона $\nu$ , м/м	0,37	0,31	0,38	0,31
Модуль сдвига $\mu \cdot 10^{10}$ , Па	4,0	7,9	12,0	7,7
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	8900	8500	10000	7900
Предел прочности при растяжении $\sigma_{раст} \cdot 10^8$ , Па	3,94	3,17	5,0	8,62
Предел текучести $\sigma_T \cdot 10^8$ , Па	2,59	0,59	3,25	5,51
Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^{-5}$ , 1/К	2,4	1,7	0,5	1,1
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/мК	388	91	150	62

Для определения зависимости НДС системы от величины и количества включений металлофазы, находящихся в режущей кромке лезвийного инструмента из СТМ дополнительно были созданы модели, отличающиеся количеством и размером включений. В результате моделирования процесса резания установлено, что с увеличением размеров включений металлофазы в два раза эквивалентные напряжения в режущей кромке увеличиваются от 3 до 5 %. При увеличении количества включений зафиксированы максимальные значения возникающих при резании напряжений, что объясняется наложением деформационных полей. Таким образом, сделан однозначный вывод о том, что при увеличении размеров и процентного содержания металлофазы в синтетических алмазах происходит незначительный рост эквивалентных напряжений в резце из СТМ, что может привести к разрушению его режущей кромки.

Поскольку максимальная степень разрушения лезвийной кромки инструмента из СТМ наблюдается при работе с ударными нагрузками, например при обработке заготовок с прерывистой поверхностью, были проведены сравнительные исследования процессов резания сплошных и прерывистых поверхностей заготовки.

Исследование процесса резания лезвийным инструментом из СТМ при обработке сплошных и прерывистых поверхностей заготовки впервые было реализовано при использовании трехмерного динамического моделирования с использованием программного пакета LS-Dyna. Исходные

модели систем «резец из СТМ – заготовка» с выполненной конечноэлементной сеткой для случаев сплошной и прерывистой поверхности заготовки представлены на рис.3.

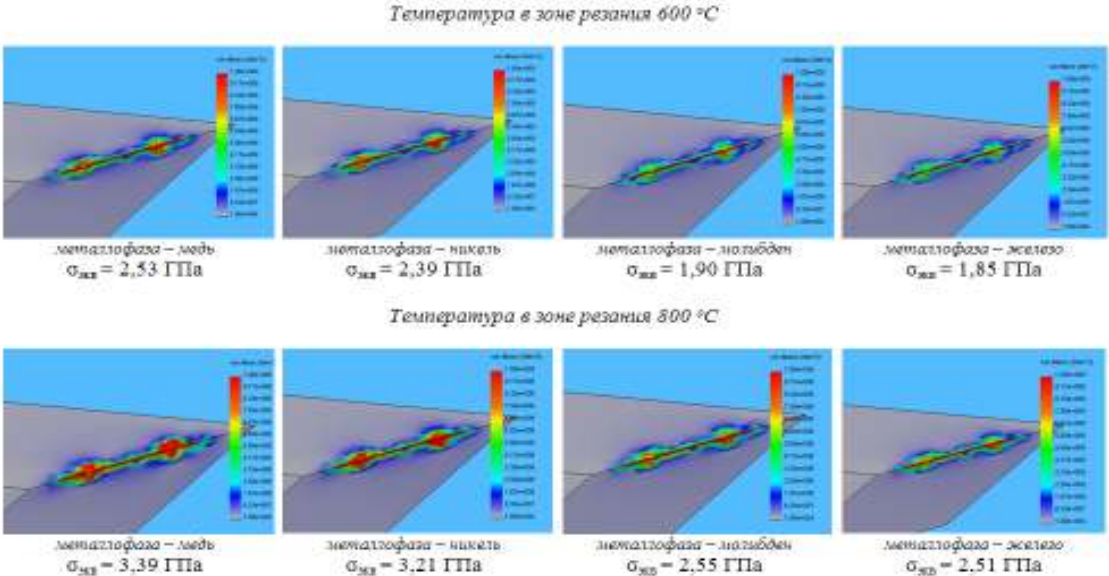


Рисунок 2 – Влияние температуры и материала металлофазы на НДС резца из СТМ

При моделировании в качестве исходных данных использовались такие параметры как скорость и глубина резания, подача, коэффициент трения, длина заготовки, материал заготовки, длина пути резания, а также геометрия режущего клина и его физико-механические свойства. Моделирование процесса резания производилось пошагово, с разбиением длины резания на интервалы, что позволяет оценить НДС инструмента на каждом конкретном участке резания.

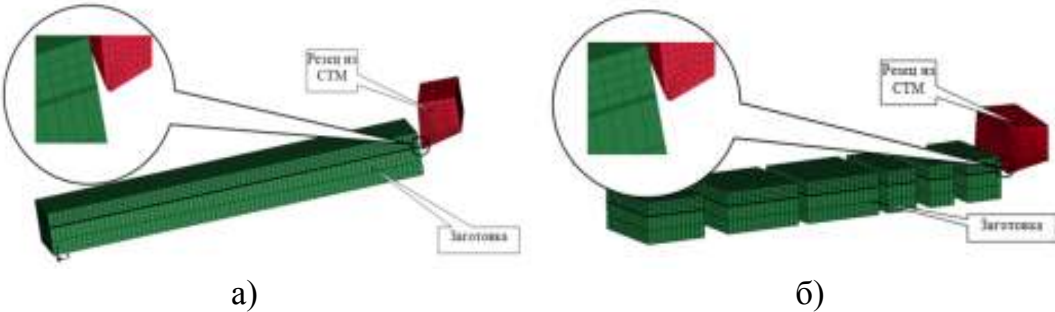
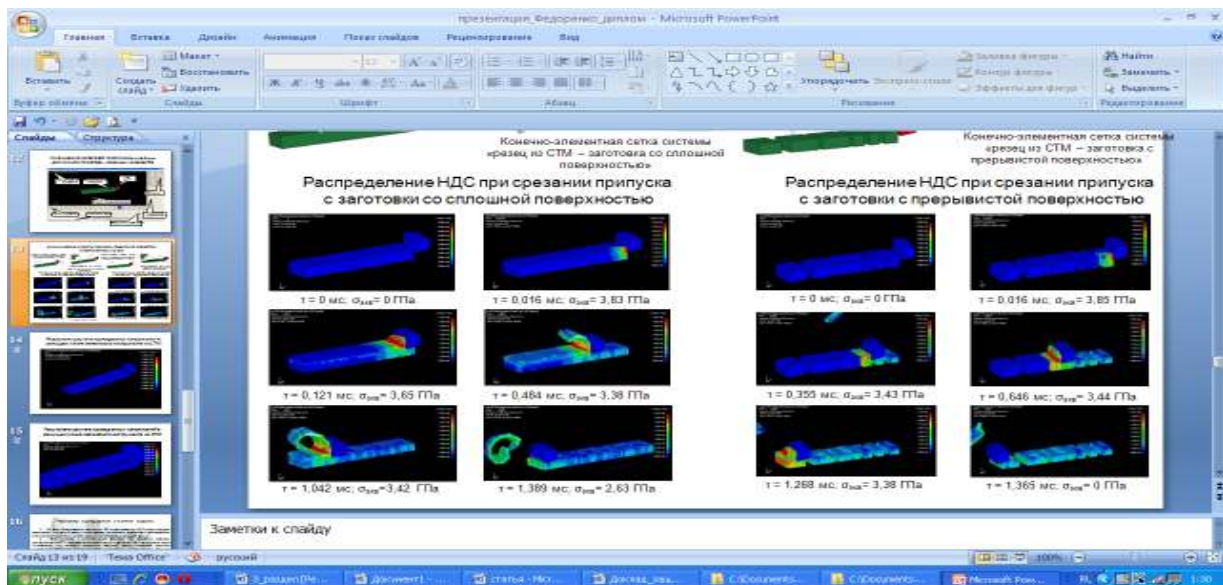


Рисунок 3 – Разработанные 3D модели с конечно-элементной сеткой для динамического моделирования процесса резания лезвийным инструментом из СТМ заготовок со сплошной (а) и прерывистой (б) поверхностями

Результаты моделирования, представленные на рис. 4, позволяют анализировать распределения температурных полей в режущей кромке лезвийного инструмента, а также рассчитать эквивалентные напряжения по Мизесу.



а) б)

Рисунок 4 – Эпюры распределения НДС при резании сплошной (а) и прерывистой поверхностей (б)

Такой подход позволил в динамике наблюдать напряженно-деформированное состояние зоны резания, а также рассмотреть поведение заготовки и лезвийного инструмента из СТМ на каждом этапе резания.

Анализ динамики изменения температуры в зоне резания, позволил сделать вывод о пропорциональности температуры и силы резания в режущем инструменте. Вероятно, этим и объяснимы циклические изменения температур в зоне резания, которые непосредственно влияют на рабочее состояние алмазного инструмента.

Программный пакет LS-Dyna позволяет также определить изменения составляющих силы резания в процессе обработки материала. Анализ распределения составляющих силы резания при лезвийной обработке заготовок со сплошной и прерывистой поверхностями отличается весьма существенно. В случае резания заготовки с прерывистой поверхностью наблюдаются скачки на графиках составляющих силы резания в местах многократного врезания и выхода лезвийного инструмента из СТМ.

Таким образом, динамическое моделирование резания, позволяет предвидеть динамику изменения напряжений в изучаемых 3D-моделях и проследить изменение напряжений при ударных нагрузках.

*Выводы и перспективы развития.* Динамическое моделирование процесса резания прерывистых поверхностей лезвийным инструментом из СТМ в отличие от статических экспериментов, позволяет проследить изменение напряжений в системе не только в квазистационарном состоянии, но и на момент врезания и выхода инструмента. Использование

полученных результатов будет способствовать повышению эффективности лезвийной обработки за счет повышения надежности работы лезвийного инструмента из СТМ. Дальнейшее изучение 3D НДС инструмента из СТМ в динамике позволит в будущем прогнозировать его поведение в процессе резания и оптимизировать свойства инструмента СТМ с целью увеличения его надежности.

**Список использованных источников:** 1. *Грабченко А.И.* Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища школа, 1985. – 184 с.; 2. *Антонюк В.С., Волкогон В.М.* и др. Высокоэффективная обработка деталей технологического оборудования инструментом из ПСТМ на основе плотных модификаций нитрида бора / Антонюк В.С., Волкогон В.М., Муковоз Ю.А., Ковалев В.Д. // Резание и инструмент в технологических системах. – Междунар. науч.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып.74. – с. 7–13; 3. [WALTER komplettiert Produktportfolio um PKD- und PCBN-Werkzeuge.](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/04_art/htm) [http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004\\_4/04\\_art/htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/04_art/htm); 4. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография в 6-ти томах. Т.1 / Под общ. редакцией *Н.В. Новикова* – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. – 466 с.; 5. *Девин Л.Н., Стахнив Н.Е.* и др. Применение метода акустической эмиссии для оценки работоспособности резцов из АТП при точении алюминиевых сплавов / Л.Н.Девин, Н.Е. Стахнив, А.Г.Найденко // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 62. – С.44–47; 6. *Девин Л.Н., Найденко А.Г.* и др. Влияние режимов резания на надежность процесса точения силуминов алмазно-твердосплавными резцами / *Л.Н. Девин, А.Г. Найденко, В.Н. Нечипоренко*// Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С.170–177; 7. *Найденко А.Г.* Визначення надійності різців в алмазних композиційних НТМ шляхом ресстрації та аналізу акустичної емісії / Автореф. дис. канд. техн. наук по спец. 05.03.01. – Київ, 2009. – 20 с.; 8. *Залого В.А., Криворучко Д.В.* Перспективы создания прогнозирующей модели процесса резания на основе базового процесса – тангенциального точения /*В.А. Залого, Д.В.Криворучко* // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції/ «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків: Курсор, 2005. – С.101–108; 9. *Криворучко Д.В., Залого В.А.* и др. Моделирование процесса обработки материалов резанием / *Д.В.Криворучко, В.А. Залого, Н.П. Кутовой* // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2009. – № 6 (117). – С.20–23; 10. *Криворучко Д.В., Залого В.А.* и др. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів: навчальний посібник / *Д.В.Криворучко, В.А. Залого, В.Г.Корбач.* – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.