

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕЗАНИИ

Калафатова Л. П. Поезд С. А.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Хрупкие неметаллические материалы (ХНМ) стали в последнее время незаменимы в силу своих уникальных прочностных и эксплуатационных характеристик, среди которых следует отметить высокие твердость и сопротивляемость сжатию при низкой удельной плотности, термостойкость, устойчивость к сжимающим нагрузкам и внешнему гидростатическому давлению. Эти свойства делают хрупкие неметаллические конструкционные материалы наиболее пригодными для применения в условиях агрессивных сред океана и космоса, в самолето- и ракетостроении.

Однако ХНМ плохо поддаются пластической деформации. Они обладают первоначальной дефектностью и свойствами хрупких материалов отрицательно реагировать на усилия извне, особенно на растягивающие и изгибающие нагрузки. В монокристаллах, вследствие взаимодействия дислокаций, появляются трещины, в поликристаллах существуют границы между зернами, поры, трещины спайности внутри зерен, которые инициируют разрушения, происходящие, главным образом, по плоскостям спайности.

Одним из представителей востребованных ХНМ являются ситаллы. Технические ситаллы – это стеклокристаллические материалы, разновидность керамики. Ситаллы представляют собой неорганические материалы, получаемые тонкой кристаллизацией стекол или расплавов различных составов, протекающей во всем объеме формуемого изделия (заготовки) [1].

Механические свойства ситаллов определяются в основном их структурой - размером кристаллов, количеством кристаллической и стекловидной фаз, их взаимным распределением. Особенности кристаллизации приводят к получению в ситаллах распределенной плотной микрокристаллической структуры, характеризуемой весьма малыми (до нескольких микрометров) размерами беспорядочно ориентированных кристаллов в стеклофазе и отсутствием пористости в общепринятом для керамик другого класса понимании. Однородность структуры обеспечивает высокие прочностные свойства ситаллов и их низкую обрабатываемость. Ситаллы обладают первоначальной дефектностью, то есть дефектностью структуры, представленной в виде микротрещин, размеры и плотность которых зависят от марки материала [1]. Для возможности качественной механической обработки изделий из ситаллов важно иметь наиболее соответствующее истине представление о том, как в них происходит развитие дефектов структуры при действии внешних нагрузок, например, усилий резания. Любые экспериментальные исследования сводятся к силовому воздействию на образец и последующему изучению расположения и глубины образованных дефектов. Это возможно при послойном удалении материала от обработанной поверхности. Но практически невозможно механически удалить слой хрупкого вещества, не спровоцировав появление дополнительных дефектов, что влияет на величину погрешности полученных результатов. К тому же эти исследования требуют значительных вложений средств. Альтернативой могут служить численно-аналитические методы исследований поведения обрабатываемого материала (ОМ) под нагрузкой, обусловленной процессом резания [2, 3].

Придание изделию из ХНМ необходимой формы осуществляется в основном за счет алмазного шлифования. Абразивная обработка – совокупность воздействий

отдельных зерен. Для исследования процессов, происходящих в материале при абразивной обработке, прежде всего, необходимо изучить механику микроразрушения обрабатываемой поверхности единичным зерном, что достаточно объективно можно сделать с использованием численных методов. Для решения задач указанного класса может использоваться метод конечных элементов (МКЭ), который нашел широкое применение при решении задач теории упругости. МКЭ универсален, так как позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние сложных конструкций, учитывать анизотропию тел, а также может быть использован для определения полей напряжений при вершине трещин в деформируемых телах. С помощью этого метода, в частности, исследовались силовые характеристики процесса взаимодействия единичного зерна-индентора с ОМ [2, 3]. Задачи решались с помощью специально разработанного программного комплекса, в библиотеке которого были предусмотрены специальные конечные элементы с разрезами, имитирующие наличие в сплошной структуре ОМ исходных дефектов трещин. Эффективность решения в каждом конкретном случае в значительной мере определяется используемым программным продуктом. Решение задач в соответствии с требованиями методики, использованной в работах [2, 3], отличалось высокой трудоемкостью и ограниченной точностью полученных результатов и сложностью их графического представления из-за ограничений, накладываемых возможностями самого программного пакета.

В настоящее время наибольшей популярностью среди различных инструментов решения задач МКЭ пользуется программный пакет ANSYS. Его программы сертифицированы на получение максимально точных решений поставленных задач. Представленная статья посвящена исследованию возможностей, открывающихся при определении напряженно-деформированного состояния зоны контакта алмазного зерна с образцом из хрупкого неметаллического материала МКЭ с использованием программного пакета ANSYS.

В условиях взаимодействия абразивного зерна с образцом размеры обрабатываемого тела значительно превышают размеры зерна и, так как в рассматриваемом случае большой интерес представляет характер распределения напряжений непосредственно под абразивным зерном в плоскости его воздействия, задачу можно свести к плоской без существенного искажения картины процесса.

При решении задачи было исследовано влияние составляющих сил резания при взаимодействии алмазного зерна с обрабатываемой поверхностью на напряженно-деформированное состояние образца. Схема нагружения образца представлена на рис. 1. Материал образца - комбинированно-дефектный ситалл [1]. Обрабатываемый материал обладает структурной дефектностью с размерами трещин 6 - 8 мкм, поверхностной плотностью этих трещин – $(1,5-2)10^9 \text{ м}^{-2}$. Физико-механические характеристики ситалла: модуль Юнга – 85000 МПа; коэффициент Пуассона – 0,25; микротвердость НВ = 8500 МПа; пределы прочности: на изгиб – 110 МПа, сжатие – 1450 МПа, растяжение – 60 МПа.

Учитывая характеристики материала и особенности его структуры, было принято, что на фрагменте образца площадью 70×70 мкм поместится десять случайно ориентированных трещин размерами 4 - 8 мкм, что показано на рис. 2. Образец нагружен силой резания, обеспечивающей, по данным эксперимента, изменение состояния обрабатываемого материала в зоне приложения нагрузки от упругого деформирования до разрушения. Характер нагружения принят статическим. При решении задачи варьировалось направление действия постоянной по величине результирующей силы резания по отношению к обрабатываемой поверхности, обусловленное соотношением нормальной

P_y и тангенциальной P_z составляющих силы резания в диапазоне $P_y / P_z = 3,5 - 6,0$, что по данным экспериментов характерно для обработки материалов на основе стекла.

Учитывая, что реальное зерно контактирует с обрабатываемым материалом по площадке, принимаем действие нормальной составляющей силы резания P_y как распределенной нагрузки по площади контакта. При решении плоской задачи это сведется к нагрузке, распределенной вдоль линии длиной 0,028 мм, если ориентироваться на средний размер алмазного зерна 350 – 400 мкм.

При решении поставленной задачи рассматривалась реальная структура образца за счет введения в его объем, прилегающий к зоне контакта образца с зерном, системы трещин, имитирующих структурную дефектность ситалла. Для плоской задачи эти трещины сосредоточены на площади размерами 560×280 мкм непосредственно под местом приложения силы. Дефектные свойства остальных участков образца учитывались его прочностными характеристиками.

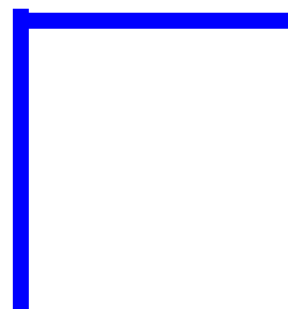
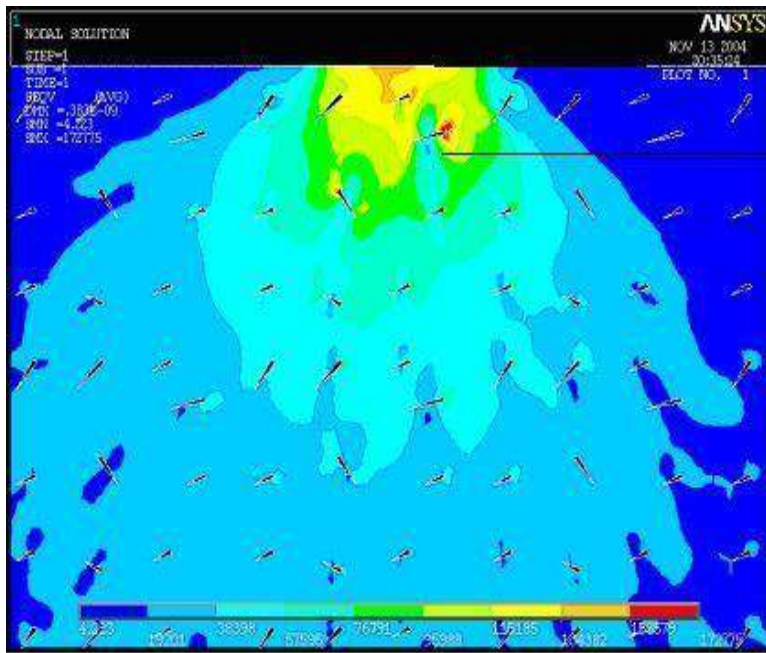


Рис. 1. Схема нагружения Рис. 2. Схема расположения исходных дефектов

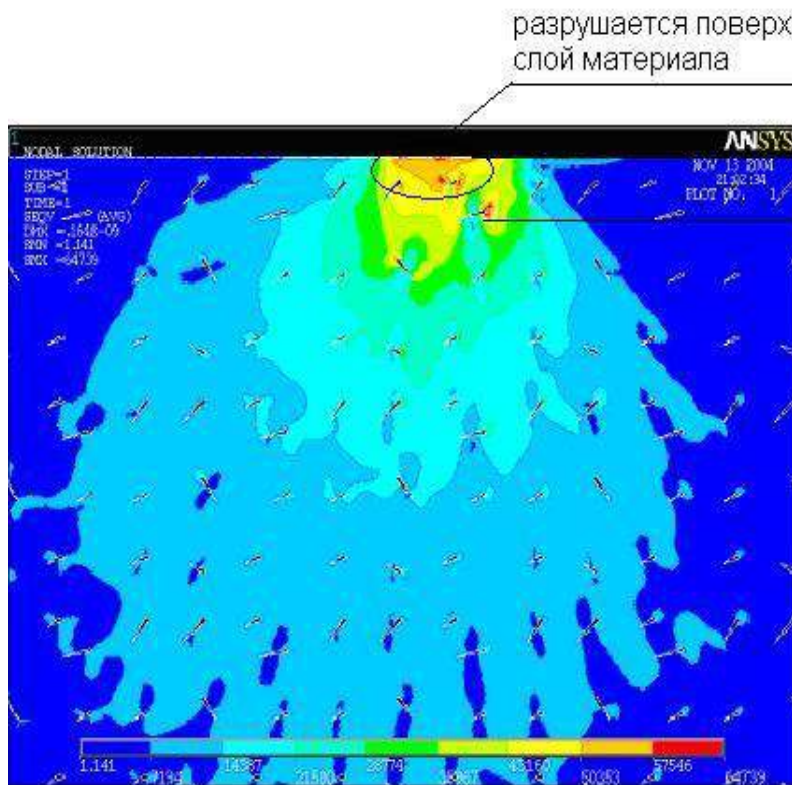
В качестве начальных условий при решении задачи выступало закрепление образца по нижней границе, обеспечивающее отсутствие перемещений в направлениях осей Y (вертикали) и Z (горизонтали). Для наиболее деформированной зоны образца определялись главные нормальные напряжения σ_1 , σ_2 и максимальные касательные напряжения τ_{\max} в каждом элементе.

Решение задачи сопровождалось получением следующих результатов. Как показано на рис. 3, при направлении результирующей силы резания максимально в глубину обрабатываемого материала ($P_{y_i} / P_{z_i} = 6$), разрушения начинаются на глубине 20 мкм в местах концентрации напряжений, то есть на кромках внутренних исходных дефектов ситалла. При увеличении доли тангенциальной составляющей в результирующей силе резания, что соответствует соотношению сил $P_{y_i} / P_{z_i} = 3,5$, помимо упомянутых выше разрушений, большим нагрузкам подвергается верхний, поверхностный слой материала (рис. 4). Это облегчает процесс диспергирования материала при удалении припуска, что позволит эффективно вести обработку при меньших силовых нагрузках на образец со стороны инструмента и положительно скажется на глубине поврежденного обработкой слоя.



разрушения начинаются на глубине 20 мкм.

Рис. 3. Напряжения, возникающие в образце, при отношении составляющих усилия резания на зерне $P_y / P_z = 6$



разрушается поверхностный слой материала

разрушения также начинаются на глубине 20 мкм

Рис. 4. Напряжения, возникающие в образце при отношении составляющих усилия резания на зерне $P_y / P_z = 3,5$

Как видно из рисунка 5, при исследованных диапазонах силовых нагрузок и соотношениях между составляющими силы резания образец испытывает в основном

напряжения сжатия. Исходные трещины-дефекты сжимаются, и их раскрытие возможно лишь в верхнем слое материала, вслед за прохождением обрабатывающего инструмента.

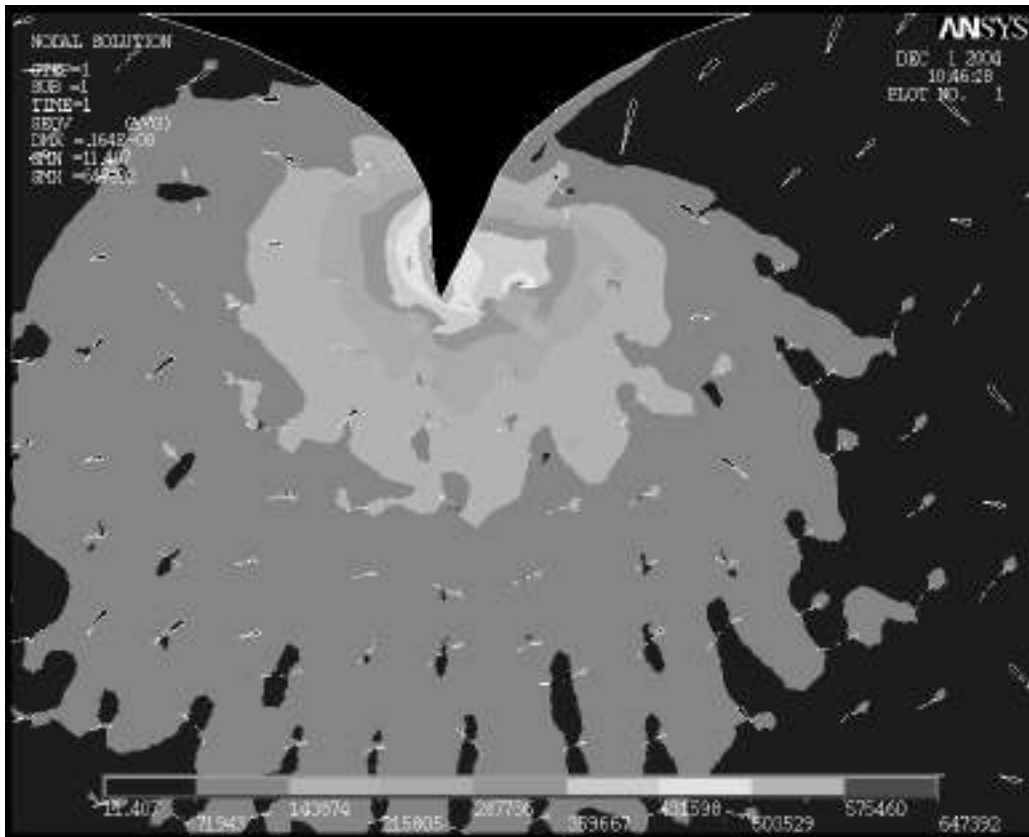


Рис. 5. Деформирование трещин в нагруженном образце

Об эффективности процесса диспергирования ОМ можно судить по затратам энергии на его реализацию [2]. Суммарная работа внешних сил $A_{\Sigma \text{ ynp}}$, вызывающая упругую деформацию микрообъемов образца, может быть найдена из уравнения

$$A_{\Sigma \text{ ynp}} = \sum_{i=1}^n u_i V_i, \quad (1)$$

где u_i - удельная потенциальная энергия, приходящаяся на единицу объема тела i -го элемента образца; V_i - объем i -го элемента образца; n - количество деформированных элементов.

Удельная потенциальная энергия u_i , приходящаяся на единицу объема тела, определяется для плоского напряженного состояния зависимостью

$$u_i = \frac{1}{2E} (\sigma_{1i}^2 + \sigma_{3i}^2 - 2\nu \sigma_{1i} \sigma_{3i}), \quad (2)$$

где σ_{1i} , σ_{3i} – наибольшее и наименьшее главные нормальные напряжения, соответственно, растяжения и сжатия; E и ν – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона ОМ.

Так как разрушение наиболее деформированной области образца, находящейся в зоне его контакта с абразивным зерном, обусловлено действием предельных как сжимающих, так и растягивающих напряжений, то для оценки напряженного состояния зоны обработки необходимо использовать такой показатель как эквивалентное напряжение $\sigma_{i_{экр}}$ [4], определяемое зависимостью

$$\sigma_{i_{экр}} = \sqrt{(\sigma_{1i}^2 + \sigma_{3i}^2 - 2\nu\sigma_{1i}\sigma_{3i})} . \quad (3)$$

Используя выражения (1) и (2), значение суммарного эквивалентного напряжения $\sigma_{\Sigma_{экр}}$ можно определить как

$$\sigma_{\Sigma_{экр}} = \sqrt{\frac{A_{\Sigma_{упр}} 2E}{V_{\Sigma}}} , \quad (4)$$

где V_{Σ} – суммарный объем материала, подвергаемый разрушению под действием напряжений первого и второго рода, величина которых превышает критический уровень.

По полученным расчетным значениям главных напряжений запас упругой энергии в элементах, находящихся в состоянии разрушения, определится с использованием зависимостей (1), (2). О рациональности схемы резания можно судить по величине коэффициента эффективности использования энергии, необходимой для диспергирования материала припуска [2, 3]. Он определяется отношением количества упругой энергии, израсходованной на разрушение при рассматриваемой схеме взаимодействия зерна индентора и образца, к суммарному запасу упругой энергии, подведенной ко всему рассматриваемому объему образца. Расчеты показали, что для схемы резания, характеризуемой отношением $P_{y_i} / P_{z_i} = 6$, на разрушение ОМ в зоне резания расходуется менее 15% подведенной энергии. Для варианта $P_{y_i} / P_{z_i} = 3,5$ эта цифра составит 25%. Последний факт свидетельствует о предпочтительности, с точки зрения эффективности использования энергии, схемы нагружения обрабатываемого материала, при которой составляющая P_{y_i} минимальна. Такое сочетание сил характерно, например, для схемы врезного торцевого шлифования.

Полученные результаты близки к тем, которые были получены в работе [3]. Однако использование программного пакета ANSYS позволяет существенно (до 2-х раз) снизить трудоемкость решения задачи по определению напряженно-деформированного состояния зоны взаимодействия единичного алмазного зерна с поверхностью ситаллового образца.

Исходя из сказанного, можно заключить, что использование программного пакета ANSYS для оценки напряженно-деформированного состояния зоны резания и поверхностного слоя изделий может оказать существенную помощь при разработке рациональных схем шлифования ХНМ.

Список литературы: 1. Дубовик В.Н., Райхель А.М. Дефектность и уровни прочности ситаллов// Проблемы прочности. – 1984. – № 7. – С. 79-84. 2. Бурмистров В.В., Калафа-

това Л.П., Дашевский Е.М. Некоторые особенности формирования напряженно-деформированного состояния в локальной области взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом // Резание и инструмент. – Харьков: ХПИ. – 1990. – Вып. 43. – С. 81-87. **3.** Калафатова Л.П. Моделирование напряженно-деформированного состояния зоны контакта единичного зерна с обрабатываемым материалом // Вісник інженерної академії України. – К.: Інженерна академія України. – 2002. – №2. – С. 56-59. **4.** Сопро- тивление материалов / Под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1986. – 755 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ РУЙНУВАННЯ КРИХКИХ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС РІЗАННЯ

Калафатова Л.П., Поезд С.А.

Зроблена спроба вивчити характер руйнування ситалів при взаємодії з одини- чним алмазним зерном. Був отриманий принцип розподілення руйнуючих напружень в залежності від напрямку результуючої сили різання.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕЗАНИИ

Калафатова Л.П., Поезд С.А.

Предпринята попытка изучения характера разрушения ситаллов при взаимодей- ствии с единичным алмазным зерном. Установлен принцип распределения разрушаю- щих напряжений в зависимости от направления результирующей силы резания.

RESEARCH OF DESTRUCTION OF FRAGILE NONMETALLIC MATERIALS AT CUTTING

Kalafatova L.P., Pоеzd S.A.

Attempt of studying of character of destruction of the polycrystalline glass sample is undertaken at interaction with an individual diamond grain. The principle of distribution of breaking points is established depending on a direction of the resulting cutting force.

Рецензент: к.т.н., доц. Гусев В.В.