

В.В. ГУСЕВ, д-р техн. наук,

Л.П. КАЛАФАТОВА, д-р техн. наук, Донецк, Украина

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ НА НАДЕЖНОСТЬ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ймовірність безвідмовної роботи відповідальних виробів із кераміки – обтічників ракет залежить від параметрів дефектного шару їх поверхні. При шліфуванні, на етапі вибору схеми обробки, характеристики шліфувального круга і режимів різання, необхідно виходити з умов зниження рівня силової дії інструмента на поверхню, що формується, який забезпечує зменшення ймовірності розвитку дефектного шару, обумовленого процесом механічної обробки. За рахунок цього підвищується надійність експлуатації виробів.

Вероятность безотказной работы ответственных изделий из керамики - обтекателей ракет зависит от параметров дефектного слоя их поверхности. При шлифовании, на этапе выбора схемы обработки, характеристики шлифовального круга и режимов резания, необходимо исходить из условий снижения уровня силового действия инструмента на поверхность, которая формируется, который обеспечивает уменьшение вероятности развития дефектного слоя, обусловленного процессом механической обработки. За счет этого повышается надежность эксплуатации изделий.

Probability of faultless work of responsible wares from ceramics – cowlings of rockets depends on the parameters of imperfect layer of their surface. Choosing the chart of treatment, description of grinding wheels and cutting parameters during grinding it is necessary to come from the decline level of power influence of instrument on the formed surface, that provided theoretic frequency diminishing of imperfect layer, conditioned the machining job process, and this way marking up reliability of their exploitation.

Введение. В России и странах НАТО основными материалами головных антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов, управляемых методом радиолокационного наведения на цель, являются кварцевая и алюмосиликатная керамики, стеклокерамика литийалюмосиликатного состава (ОТМ357) и термостойкие стеклокристаллические материалы (ситаллы или ситаллокерамика) [1], которые также относятся к группе керамических материалов. Головной радиопрозрачный антенный обтекатель является важным элементом современных скоростных летательных аппаратов, управляемых методом

радиолокационного наведения. При эксплуатации в обтекателе возникают большие механические напряжения.

К изделиям радиотехнического назначения предъявляют высокие требования по точности формы, по отклонению от заданной толщины стенки ($\leq \pm 0,1\text{мм}$) и качеству поверхности ($R_a \leq 2,5\ \mu\text{км}$). Это связано с необходимостью обеспечения требуемых радиотехнических характеристик изделия. Чем выше величина диэлектрической проницаемости материала изделия, тем более высокие требования предъявляются к нему по допускам на толщину стенки [2]. Необходимость механической обработки крупногабаритных изделий из ситаллокерамики связана со значительной усадкой материала (5,5-6%) при термообработке [1], что вызывает коробление заготовок. Одной из основных причин отказов сложных систем авиационной и ракетно-космической техники является разрушение входящих в их состав высоконагруженных деталей из конструкционной керамики, обусловленное повреждаемостью материала при формообразовании [3]. Повышение механической прочности, эрозионной стойкости, создание обтекателей с селективным пропусканием электромагнитной энергии в заданном интервале частот в настоящее время связано с усовершенствованием методов их механической обработки [1].

Остаточные напряжения, обусловленные механической обработкой, в серийно выпускаемых обтекателях из кварцевой керамики и ОТМ357 не превышают 1-1,2 МПа, что значительно меньше прочностных свойств керамики, и они не способны повлиять на их несущую способность в условиях эксплуатации. Однако прочность изделий из ситаллов в значительной степени зависит от наличия дефектов структуры материала и дефектов, вызванных механической обработкой, которые вызывают разрушение обтекателей при испытаниях и эксплуатации. Целью настоящей работы является исследование причин формирования дефектного слоя при механической обработке ситаллокерамических обтекателей, в частности из ситалла АС- 418, и анализ его влияния на прочность изделий.

Основное содержание. Основным показателем, характеризующим несущую способность деталей из керамики, является коэффициент запаса прочности, равный отношению допустимой прочности на растяжения материала σ_p к максимальному напряжению σ_{max} , возникающему в нем от воздействия на деталь тепловых и силовых нагрузок. Как показали результаты прочностного расчета обтекателя, выполненные на основе моделирования напряженно-деформированного состояния оболочки

вращения под действием произвольной нагрузки и нагрева с учетом поперечного сдвига [3], максимальные напряжения, возникающие в материале оболочки из ситаллокерамики в ее наиболее нагруженном меридианном направлении, описываются нормальным распределением с математическим ожиданием $m(\sigma_{po}) = 44$ МПа и среднеквадратическим отклонением $s(\sigma_{po}) = 3$ МПа.

Зная математическое ожидание $m(\sigma_{po})$ и среднеквадратическое отклонение $s(\sigma_{po})$ прочности изделия после механической обработки, можно определить допустимое значение прочности σ_d , при котором с вероятностью 95% (99%) обеспечивается получение детали с гарантированной прочностью $\sigma_d = m(\sigma_{po}) - z \cdot s(\sigma_{po})$.

Известно [4], что поверхностная плотность дефектов структуры ситалла АС-418 $-n_c = (1,5..2,0) \times 10^9$ шт./м²; максимальные размеры дефектов структуры (за исключением дефектов материала в виде раковин) составляют 12,0 мкм, а параметр трещиноватости при учете только дефектов структуры $r_c = 12$; трещиностойкость ситалла $K_{1c} = 1,7 \pm 0,1$ МПа·м^{1/2}; индекс хрупкости - $HV / K_{1c} = 4,58$ мкм^{-0,5}. Структура дефектного слоя, вызванного механической обработкой и в основном определяемая максимальной полудлиной обработочных трещин $l_{o,max}$ и параметром трещиноватости r_o [5], зависит от индекса хрупкости обрабатываемого материала и уровня силового воздействия на обрабатываемую поверхность со стороны режущего инструмента, ухудшаясь по мере его увеличения.

Установлено [6, 7], что, в свою очередь, изменяя такие входные параметры технологического процесса обработки как схема и режимы шлифования, характеристика и степень износа алмазно-абразивного инструмента, свойства используемых СОТС, можно существенно воздействовать на силовые характеристик процесса шлифования, положительно влияя на структуру возникающего дефектного слоя. Исследование дефектности ситаллов осуществляли методом люминесцентной дефектоскопии в сочетании с послойным химическим травлением образцов. Для детального исследования дефектной поверхности использовался люминесцентный микроскоп серии "Люмам", позволяющий наблюдать и фотографировать изображение объекта в свете люминесценции при максимальном увеличении в 2500 крат. Травление образцов производилось от уровня обработанной поверхности с шагом 20

мкм. Общая глубина травления определялась выполнением требования выхода на слои материала, не содержащие дефектов, обусловленных обработкой. Контроль структуры дефектности на различных глубинах осуществлялся по цифровым фотоснимкам наиболее характерных участков поверхности образцов. По микрофотографиям дефектной поверхности определялся вид дефектов, и обсчитывались параметры дефектности с использованием специально разработанной программы на ЭВМ.

Оценка структуры дефектного слоя осуществлялась по следующим показателям: глубина проникновения дефектов (h_d , мкм), определяемая выходом на уровень травления, соответствующий полному отсутствию дефектов, вызванных обработкой; относительная плотность дефектов (S_{om} , %), определяемая отношением площади, занятой дефектами, ко всей исследуемой площади образца; относительная объемная плотность дефектов в разрушенном обработкой слое (V_{om} , %), определяемая отношением объема, занятого дефектами обработки, ко всему объему поверхностного слоя образца, нарушенного обработкой.

Так, например, зная зависимость нормальной составляющей силы резания P_y от режимов обработки при продольном круглом шлифовании (скорости круга v_k , скорости заготовки v_d , глубины резания t и продольной подачи s)

$$P_y = 75,3v_k^{-0,55}s^{0,68}t^{0,92}v_d^{0,7},$$

можно получить следующие параметры структуры обработочных дефектов (рис. 1).

Интенсивность развития дефектного поверхностного слоя изделий при механической обработке ситаллов определяется уровнем нормальной составляющей силы резания P_y , которая, в свою очередь, зависит от уровня параметров режима шлифования. Действительно, при увеличении параметров режима резания, прежде всего скорости перемещения детали v_d (или вращения детали w_d) и глубины шлифования t и, как следствие, роста силы P_y относительная плотность дефектов возрастает, достигая максимальных значений на глубине 70...100мкм (см. рис.1).

Графики, представленные на рис. 1, иллюстрируют изменение относительной плотности дефектов в зависимости от глубины залегания для различных условий шлифования, представленных минимальным и максимальным уровнем варьируемых параметров. Как видно из этих

рисунков, полученные экспериментальные зависимости $S_{om} = f(h_d)$ имеют экстремальный характер при обработке ситалла на всех режимах. Причем максимальная плотность и размеры дефектов приходятся на интервал глубин $h_d = 60-90$ мкм.

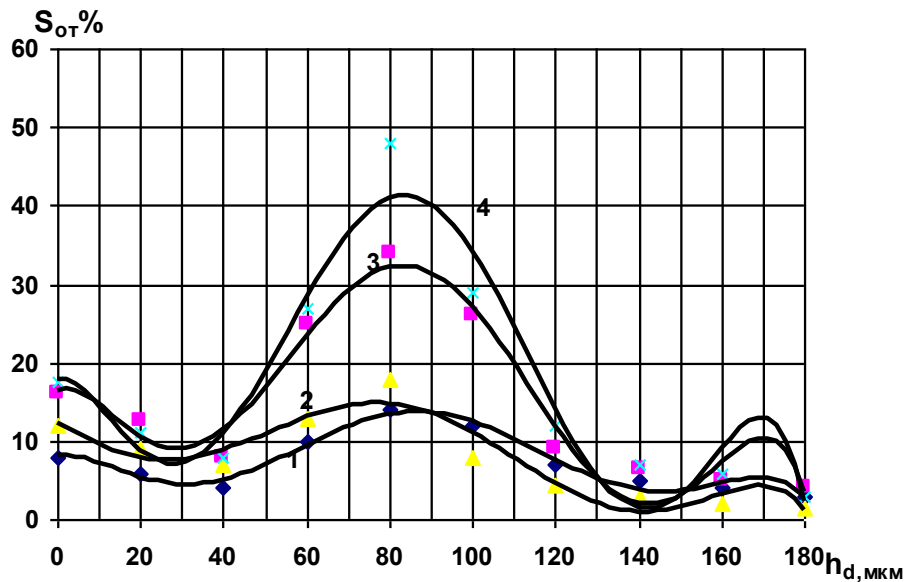


Рисунок 1 – Зависимость относительной плотности дефектов от глубины залегания при шлифовании ситалла АС-418 алмазным кругом зернистости 125/100 с режимами $v_k = 33$ м/с: 1- $t = 0,3$ мм, $s = 14,5$ мм/мин, $w_\delta = 10,5$ л/с; 2 - $t = 0,9$ мм, $s = 14,5$ мм/мин, $w_\delta = 10,5$ л/с; 3 - $t = 1,4$ мм, $s = 14,5$ мм/мин, $w_\delta = 10,5$ л/с; 4 - $t = 0,9$ мм, $s = 23,0$ мм/мин, $w_\delta = 10,5$ л/с.

Зависимости $S_{om} = f(h_d)$ в рассматриваемом диапазоне глубин залегания (0-180 мкм) имеют идентичный характер при всех сочетаниях параметров обработки. Исходная относительная плотность дефектов несколько выше, чем при $h_d = 30-40$ мкм. При шлифовании ситалла алмазным кругом указанной зернистости ее значение лежит в интервале 8-17% и имеет тенденцию к возрастанию с повышением интенсивности обработки (см. рис. 1, кривые 3, 4). На этих же режимах достигаются максимальные значения S_{om} . Увеличение глубины резания в 4,7 раза приводит к росту S_{om} в 2,5 раза, а увеличение подачи в 1,6 раза сопровождается приблизительно таким же возрастанием S_{om} (в 2,7 раза), оставаясь при этом на 30% большим, чем при увеличении t . Приведенные

результаты свидетельствуют о том, что увеличение подачи по сравнению с увеличением глубины вызывает более интенсивное возрастание плотности дефектов в зоне ее максимальных значений. Увеличение скорости вращения детали на 20% приводит к возрастанию S_{om} в пределах 5-10%, что объясняется увеличением сил резания, и по максимальному уровню соответствует кривой 4 на рис. 1.

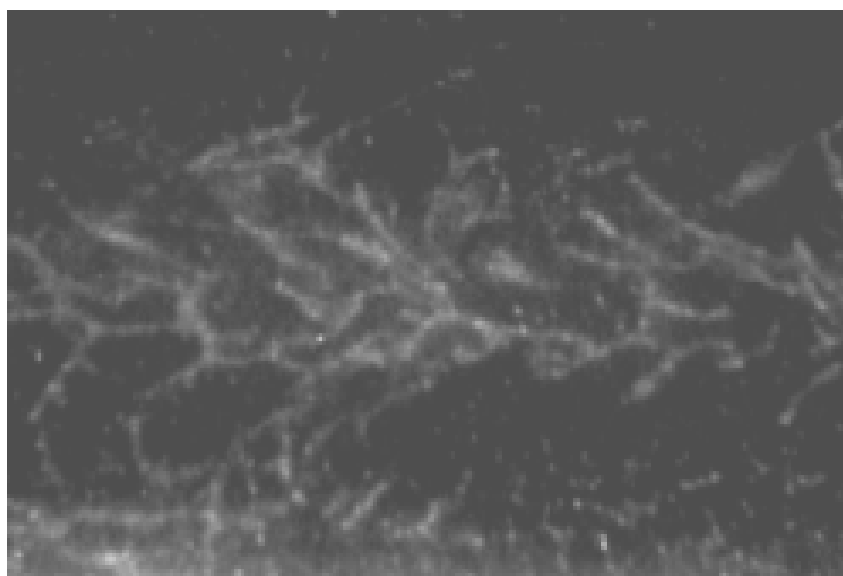


Рисунок –2 Обработочная дефектность шлифованной поверхности образца из ситалла АС-418 (после удаления рельефного слоя на глубину 0,01мм); режимы шлифования $v_k=32\text{м/с}$, $v_d=32\text{м/мин}$, $t=0,3\text{мм}$. Увеличение $\times 150$.

При этом относительная плотность дефектов, обусловленных обработкой, по глубине изменяется нелинейно. Происходит чередование участков поверхностей образца с максимальной и минимальной относительной плотностью дефектов. Периодическое изменение плотности дефектов по глубине образца связано с ветвлением трещин (дефектов обработки), возникающих в объеме обрабатываемого образца при определенных условиях его нагружения, и последующим периодическим выходом ветвящихся трещин на уровень стравливаемой поверхности. Такое явление называют бифуркацией [8]. Интегральным показателем качества структуры дефектного слоя деталей из ситалла может служить относительная объемная плотность дефектов в нарушенном обработкой поверхностном слое образца.

Как показали результаты выполненных исследований, поверхностная плотность обработочных дефектов n_o для ситалла АС-418 составляет

порядка 4×10^6 шт./м², при этом максимальные обработочные дефекты располагаются на глубине 60...100 мкм (см. рис.1), что можно учесть при определении предельного разрушающего усилия введением соответствующего коэффициента расположения трещины k_p . (для трещины на поверхности $k_p=1,11$, в остальных случаях $k_p=1$) и k_ϕ – коэффициента, учитывающего соотношение полудлины l и глубины трещины h_T , оказывающих влияние на интенсивность напряжений. Может быть учтено, что $k_\phi = \frac{1 + 4,5(l/h_0)^4}{1 - (l/h_0)}$ при отношении $l/h_0 \leq 0,5$ и $k_\phi = \sqrt{1 + 2(l/h_0)}$ при $l/h_0 \leq 0,25$.

Кроме этого необходимо учитывать расположение трещин обработки относительно наиболее нагруженного меридианного направления. Дефекты обработки ориентированы от указанного направления под углом 0-60° (рис.2).

Определение значений $m(\sigma_{po})$ $s(\sigma_{po})$ с учетом наличия двух видов дефектов (структурных и обработочных) произведем в соответствии с зависимостью, приведенной в работе [10]. Как показали расчеты, увеличение режимов резания при чистовом продольном круглом шлифовании ситалла АС-418 приводит к существенному снижению средней прочности деталей (рис. 3).

С учетом масштабного фактора прочность изделия снижается до $m(\sigma_{po})=56$ МПа при среднеквадратическом отклонении $s(\sigma_{po})=6$ МПа. Если в дальнейшем не производить обработку изделия, обеспечивающую удаление дефектного слоя, вероятность безотказной его эксплуатации составит лишь 0,75, что является не допустимым для данного класса изделий. Вероятность безотказной работы изделия должна быть не менее 0,98, что соответствует допустимой прочности обтекателей 93 МПа [3]. При отсутствии в поверхностном слое изделия дефектов обработки и дефектов материала в виде раковин расчетная прочность такого материала составляет 140 МПа. Удаление дефектного слоя, вызванного обработкой, позволяет получить 98% изделий с гарантированной прочностью на изгиб 180 МПа при среднеквадратическом отклонении $s(\sigma_u)=30$ МПа [4]. При

этом вероятность того, что предел прочности изделия будет меньше допустимого, исходя из условий эксплуатации, не превышает 0,4 %.

Таким образом, при обработке комбинированно-дефектных ситаллов, к которым относится ситалл АС-418, необходимо усовершенствование технологического процесса (ТП) механической обработки с целью уменьшения или полного устранения вызванного ею дефектного слоя. Одним из условий усовершенствования ТП является выбор инструмента и схемы обработки изделий.

При алмазном шлифовании внутреннего контура обтекателей из ситалла его формирование производится последовательно несколькими инструментами различных видов и типоразмеров. В местах контура изделия, в которых осуществляется переход от одного вида инструмента к другому, возникают наибольшие по величине и глубине трещины. Если эти трещины не удалить, то они могут спровоцировать разрушение изделия. Глубина проникновения подобных трещин достигает 0,3 ..0,4 мм.

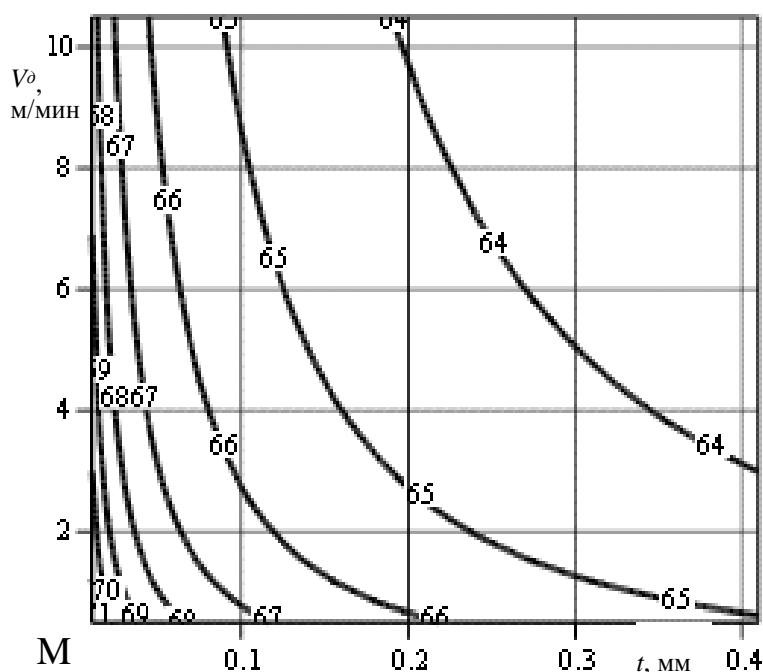


Рисунок 3 – Зависимость средней прочности $m(\sigma_{po})$, МПа ситалла АС-418 в зависимости от скорости детали v_d и глубины t резания при продольном круглом шлифовании кругом 1А1 200-10-3-60-76 АС6 125/100-4- М2-01 и скорости резания $v_k = 30$ м/с

Особые трудности вызывает обработка вершины внутреннего контура обтекателя, реализуемая путем сверления алмазным кругом в сплошном материале. Данный переход характеризуется высокой трудоемкостью и сопровождается формированием массивного дефектного слоя большой глубины. Устранение возможности возникновения трещин в местах стыковки кругов различного диаметра при формировании внутреннего контура изделия обычными технологическими приемами вызывает трудности, поэтому за рубежом в этих целях применяют специальный инструмент [9]. Для снижения трудоемкости обработки вершины конического отверстия обтекателей были разработаны схемы сверления (А.с. СССР №1463403, А.с. СССР №1808498) и конструкции специального алмазного инструмента, устраняющие «подрезы» при обработке внутреннего контура изделия. Также разработаны способы шлифования (патент України №54942, Декларацийний патент на винахід. Україна (UA). 65894 А), обеспечивающие перераспределение припуска по рабочей поверхности круга и за счет этого формирование заданной структуры поверхностного слоя керамики, что позволяет сократить продолжительность механической обработки при обеспечении эксплуатационных характеристик изделий.

Тем не менее, после механической обработки ответственных изделий, к которым относятся и обтекатели из ситалла, в производственных условиях удаляют оставшийся после обработки дефектный слой методом химического травления с последующим ионным упрочнением формируемой поверхности. Операция травления экологически вредна и значительно повышает трудоемкость изготовления обтекателей. С уменьшением глубины дефектного слоя снижается трудоемкость его удаления при травлении обработанной поверхности.

Выводы. Таким образом, можно заключить, что структура и физико-механические характеристики ситалла обеспечивают требуемую прочность обтекателей, но наличие в их поверхностном слое обработочных дефектов уменьшает вероятность безотказной работы изделий ниже допустимого уровня, то есть, меньше 0,98. При шлифовании, выбирая схему обработки, характеристику шлифовального

круга и режимы резания, необходимо исходить из снижения уровня силового воздействия инструмента на формируемую поверхность, что обеспечивает уменьшение вероятности развития дефектного слоя, обусловленного процессом механической обработки, в глубину изделия. Это позволит существенно снизить трудоемкость обработки изделия, прежде всего, экологически небезопасной операции химического травления.

Список использованных источников: 1. Суздальцев Е.И. Радиопрозрачные, высокотермостойкие материалы XXI века // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – №3. – С.42-50. 2. Исследование влияния режимов механической обработки ситаллокерамических изделий в системе: станок – изделие – инструмент - схема / Е.И. Суздальцев, А.С. Хамицаев, А.Г. Эпов, Д.В. Харитонов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – №7. – С.23-30. 3. Анализ соответствия прочности стеклокерамики ОТМ357 требованиям к конструкции обтекателя / Е.И. Суздальцев, М.Ю. Русин, В.И. Куракин, А.С. Хамицаев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – №7. – С.9-12. 4. Дубовик В.Н., Райхель А.М. Дефектность и уровни прочности ситаллов // Проблемы прочности. – 1984. – №7 – С.79-84. 5. Гусев В.В. Силы резания и формирование дефектного слоя при алмазном шлифовании керамики // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2003.- Вип. №13. – С. 70-76. 6. Калафатова Л.П. Возможности управления дефектностью шлифованной поверхности материалов на основе стекла за счет изменения параметров технологического процесса обработки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. трудов. - Донецк: ДонГТУ. - 1999. - Вып. 8. - С. 100 -108. 7. Калафатова Л.П. Влияние схемы шлифования на надежность процесса обработки изделий из стекломатериалов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць. - Краматорськ: ДДМА - 1999. - Вип. 9. - С. 218-221. 8. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела: Учебник для вузов. Прикладная механика сплошных сред; Т.2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 420с. 9. Витвицкий П.М., Пожена С.Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел - Киев: Наукова думка, 1980. - 187с. 10. Гусев В.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных требований к изделиям из конструкционной керамики // Резание и инструмент в технологічних системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2007. – Вип.73. – С.55-62. 11. Thomas F. One grinder conquers nose cone // Grinding finishing. – 1963. – Vol.9, №9. – P.32-35.