

УДК 621. 923.1:66/68

Л.П. Калафатова, профессор, д-р техн. наук,

С.А. Поезд

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83001

lpk04nov@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ СИТАЛЛОВ

Рассмотрены вопросы минимизации себестоимости шлифования изделий из труднообрабатываемых неметаллических материалов на примере ситаллов при обеспечении требуемого качества обработанной поверхности.

Ключевые слова: *оптимизация, себестоимость, режимы шлифования, распределение припуска.*

Тенденция вытеснения металлических деталей и элементов конструкций с заменой их более дешевыми и функциональными неметаллическими материалами, к которым относится стеклокерамика (ситаллы), свойственна всем отраслям народного хозяйства. Точности размеров и качества поверхностей этих изделий, необходимых для использования их в виде деталей машин и ответственных конструкций, можно достичь лишь с применением механической обработки (алмазного шлифования). Подобная обработка сопровождается силовыми и температурными нагрузками на обрабатываемый материал, и, в результате, развитием дефектного слоя – системы трещин, каждая из которых служит концентратором напряжений. Это значительно снижает качество обработанной поверхности и может вызвать досрочное разрушение деталей при эксплуатации. Необходимость удаления дефектного слоя на последующих доводочных операциях либо на операции химического травления и ионного упрочнения обуславливает высокие затраты и значительно увеличивает конечную стоимость изделия.

Построение технологического процесса (ТП) механической обработки ситаллов, при котором возможно достичь минимума себестоимости изделий без ущерба качеству сформированной поверхности – важная задача, возникающая на этапе проектирования ТП обработки. Достижения минимума себестоимости можно добиться как за счет оптимизации режимов шлифования, так и за счет уменьшения количества операций (переходов, проходов) при неизменном качестве сформированной поверхности.

Решению задачи оптимизации режимов обработки посвящено большое количество исследований, это сложная математическая задача и для ее решения в полном объеме требуются сложные математические вычисления. При нахождении оптимальных режимов, позволяющих обеспечить минимум технологической себестоимости обработки изделий, необходимо учитывать их (режимов) влияние на условия протекания и параметры процесса резания, состояние элементов технологической системы, в том числе, и на качество формируемой поверхности.

Цель статьи заключается в разработке методик нахождения оптимальных режимов шлифования с одновременным распределением припуска по операциям (переходам, проходам) обработки хрупких неметаллических материалов (ХНМ) на примере ситаллов, что позволит достичь минимума технологической себестоимости обработки изделий при учете особенностей протекания процесса обработки, перечисленных выше.

Проведенные исследования, связанные с изучением особенностей обработки ХНМ (ситаллов), и анализ результатов, полученных другими авторами [1, 2], позволили определить приведенные ниже целевую функцию (1), ее составляющие (2 – 5) и ограничения (7). Рассматривался процесс плоского алмазного шлифования ситаллов периферией круга по жесткой схеме.

Технологическая себестоимость обработки $C_{T_{шл}}$ (целевая функция при решении задачи оптимизации) является суммой стоимостей отдельных операций шлифования:

$$C_{T_{шл}} = \sum_{i=1}^n C_{T_{шл_i}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где n – количество операций, необходимых для достижения требуемого качества при обработке рассматриваемой детали; $C_{T_{шл_i}}$ – технологическая себестоимость одной операции.

Операция может состоять из нескольких переходов, а переход из нескольких проходов обработки. Технологическая себестоимость операции плоского шлифования периферией круга $C_{T_{шл}}$, с учетом правки, осуществляемой непосредственно на станке без прерывания цикла обработки, выраженная через варьируемые параметры $\langle \varphi, s, t \rangle$, имеет вид:

$$C_{T_{uz}}(v, s, t) = \sum_{j=1}^m \left(t_M \left(c_{cm} k_t + c_{cm} + c_{np} \cdot \frac{t_{np}}{T} \right) + \frac{C_u}{h_{kp}} \left(J_W + J_{np} t_{np} \left(\frac{t_M}{T} \right) \right) \right), \quad (2)$$

где m – количество переходов (проходов) в рассматриваемой операции; $J_W = f(v, s, t)$ – линейный износ круга за время обработки; $t_M = f(s)$ – машинное время одного прохода; $T = f(v, s, t)$ – стойкость алмазного круга; $c_{ст}$ – стоимость одной минуты эксплуатации станка с учетом зарплаты рабочего; $c_{спр}$ – стоимость одной минуты правки круга; t_{np} – время правки круга; $k_t = \frac{t_x}{t_M}$ – коэффициент простоя оборудования; t_x – суммарное время простоя, которое приходится на одну деталь; J_{np} – линейный износ круга за единицу времени правки, отнесенный к одной детали, зависит от режима и способа правки; h_{kp} – толщина алмазосодержащего слоя круга; C_u – начальная стоимость круга.

Зависимость стойкости алмазного инструмента от режимов обработки и характеристик инструмента, исходя из найденной экспериментально режущей способности алмазного круга Q [2], при решении задачи оптимизации используется как составляющая целевой функции и имеет вид:

$$T(v, s, t) = \frac{\ln Q_{don} - \ln(0,43 + 0,0014 \cdot d_z) - \ln(0,17 + 0,025v)}{(-0,0227 - 0,00074v - 0,0044s - 0,0045t)^2 \cdot (-0,022d_z) \cdot 6t \cdot s}, \quad (3)$$

где Q_{don} – допустимое значение коэффициента режущей способности круга; d_z – средний размер зерна.

Зависимость линейного износа круга от объема сошлифованного материала W и режимов обработки (v, s, t) [2] так же учтена в целевой функции и имеет вид:

$$J_W(v, s, t) = 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-0,0058d_z} \cdot (0,004 \cdot s^{4,41} \cdot t^{0,83-3,92 \ln s}) + 4,26 \cdot v^{-1,46} \cdot t^{0,56} \cdot W / B_k. \quad (4)$$

Машинное время при шлифовании детали длиной L_0 определяется по формуле:

$$t_M = \frac{L_0 + \Delta L}{1000 \cdot s} K_{II}, \quad (5)$$

где L_0 – длина шлифуемой поверхности; ΔL – длина врезания и перебега круга соответственно;

$K_{II} = \left[\frac{B_0}{B_k} \right] + 1$ – количество шагов поперечной подачи, округленное в большую сторону; B_0 – ширина шлифования; B_k – ширина круга.

Таким образом влияние режимов обработки на стойкость алмазного инструмента и на его линейный износ в процессе обработки, а также износ инструмента при правке учтены в целевой функции. Остальные требования, учет которых необходим для правильного описания технологического процесса и обеспечения качества изделий при решении задачи оптимизации, выступали в роли ограничений. Они представлены ниже.

Влияние режимов и условий обработки на составляющие силы резания учитывалось согласно зависимостям, полученным экспериментально [3], и имеющим вид:

$$P_z = C_{Pz} \cdot v^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma \leq P_{donPz} \quad (6)$$

$$P_y = C_{Py} \cdot v^{\alpha'} \cdot s^{\beta'} \cdot t^{\gamma'} \leq P_{donPy}$$

где P_z, P_y – тангенциальная и нормальная составляющие силы резания; $C_{Pz}, C_{Py}, \alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'$ – соответственно, коэффициенты и показатели степени, полученные экспериментально, и зависящие от зернистости круга d_z , свойств применяемых СОТС и режущей способности инструмента; P_{donPz}, P_{donPy} – допустимые, исходя из условий обработки, значения тангенциальной и нормальной составляющих силы резания.

Зависимости, позволившие оценить влияние режимов и условий обработки на температуру резания, аналогичны уравнениям (6), получены экспериментально, и имеют коэффициенты, зависящие от свойств применяемых СОТС и режущей способности инструмента.

Специфика обработки шлифованием ХНМ и, в частности, ситаллов заключается в формировании и развитии дефектов (микротрещин) при любом механическом воздействии на материал. Максимальное влияние на развитие дефектного слоя, как было установлено [1, 2], оказывает нормальная составляющая силы резания P_y , увеличение которой усугубляет распространение нарушенного обработкой дефектного слоя. Исходя из сказанного, ограничение, позволяющее учитывать влияние условий обработки на

размеры возникающих обработочных дефектов и глубину их проникновения, выглядит следующим образом:

$$D=f(P_y) \leq D_{\text{дон}}, \quad (7)$$

где D – средний размер обработочных дефектов; $P_y = f(t, s, v)$; $D_{\text{дон}}$ – допустимый с точки зрения условий эксплуатации деталей размер дефектов.

Функции $D = f(P_y)$ были получены при использовании экспериментальных данных [1] для кругов с зернистостями 250/200, 125/100, 100/80. На рисунке 1 приведены зависимости $D = f(P_y)$, характеризующие дефектную поверхность при шлифовании ситалла инструментом зернистостью 125/100 для разных уровней залегания ($h_{\text{тр}}$), определяемых при травлении обработанной поверхности образцов.

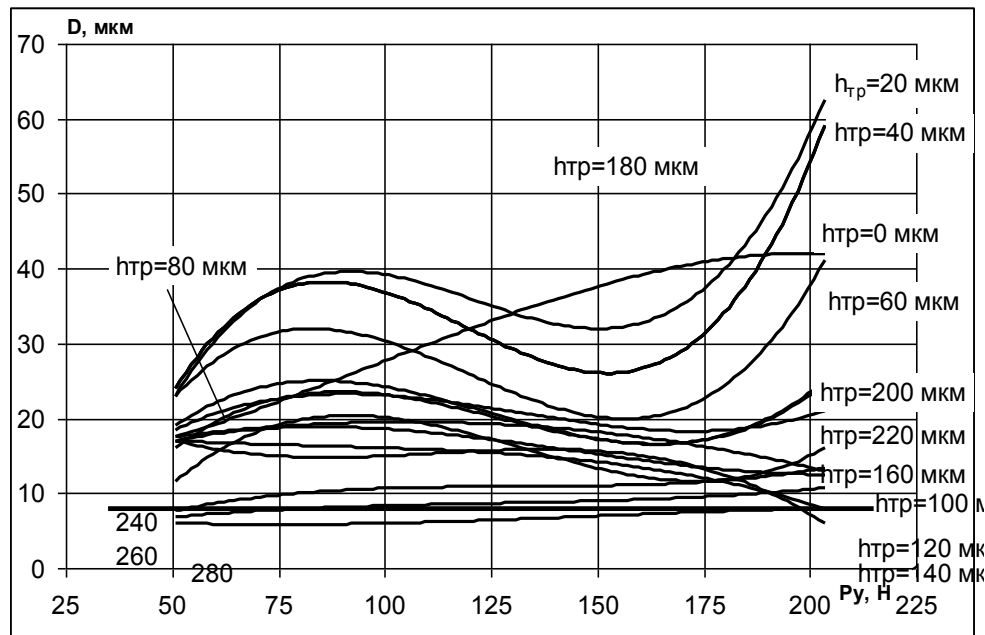


Рисунок 1 – Зависимость величины усредненного единичного дефекта D от значений силы P_y на разных уровнях травления ($h_{\text{тр}}$) при шлифовании технического ситалла АС-418 алмазным кругом АС6 125/100 – 4 – М2-01[1]

Общепринятые существующие рекомендации по организации технологического процесса обработки ХНМ базируются на подходе к распределению припуска, используемом при обработке металлов, включающем, в качестве обязательного условия, некоторое превышение припуска на конкретной операции или переходе относительно глубины разрушенного слоя, сформированного при предыдущей обработке. При алмазном шлифовании подобных материалов удаление припуска Z_1 (рисунок 2) вызывает образование дефектного (разрушенного) слоя глубиной H_{p_1} . В этом случае образованный дефектный слой удаляется на следующей операции при более «мягких» режимах инструментом с меньшей зернистостью, и внесенные обработкой разрушения (дефектность) распространяются на меньшую глубину $H_{p_2} < H_{p_1}$.

При удалении этого дефектного слоя H_{p_2} вносится дефектность на глубину $H_{p_3} < H_{p_2} < H_{p_1}$. Дефектный слой, оставшийся после последней операции механической обработки, удаляется на операциях химического травления и ионного упрочнения.

Однако, как было установлено [1], совсем не обязательно удаление всего дефектного слоя, полученного ранее, на промежуточных этапах обработки. Одним из путей повышения эффективности обработки деталей из ХНМ является рациональное перераспределение припуска по операциям обработки при удалении поверхностного разрушенного слоя, оставшегося после чернового шлифования (наиболее интенсивного), при последующей обработке заготовки. Переход от черновых операций к полустовым и чистовым сопровождается уменьшением зернистости инструмента и изменением режимов обработки, режимы становятся менее напряженными. При этом уменьшаются величина микронеровностей обработанной поверхности и глубина дефектного слоя, улучшается его структура – дефекты становятся меньше, изменяется их плотность.

При определенной глубине шлифования размеры дефектов, вносимых работающим инструментом в обрабатываемую поверхность, становятся соизмеримыми, а при дальнейшем заглаблении и более

крупными, чем те, которые оставлены на этом уровне в результате выполнения предыдущих, более напряженных операций. Поэтому величину припуска, связанную с глубиной дефектного слоя, оставленного в материале при предшествующей обработке и снимаемого на данной операции (переходе), целесообразно назначать, исходя из равенства размеров вносимого дефекта и уже внесенного ранее (рисунок 3).

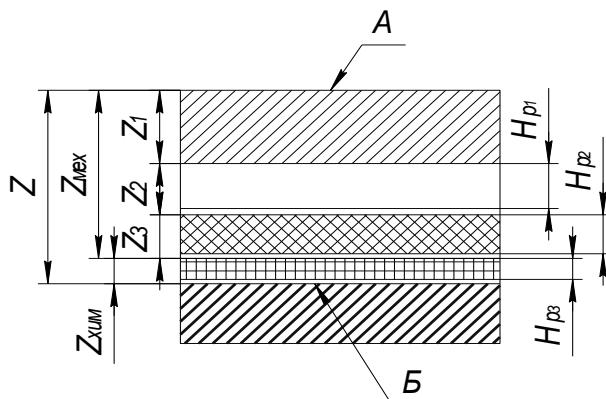


Рисунок 2 – Схема расчета припусков на обработку изделий из ХНМ (ситаллов) по традиционной методике: А, Б – соответственно, поверхность заготовки и окончательно сформированная поверхность изделия; $Z_1, Z_2, Z_3, Z_{хим}$ – припуски, подлежащие удалению, соответственно, на операциях чернового шлифования, чистового шлифования, механического полирования, химического травления и ионного упрочнения; H_{p1}, H_{p2}, H_{p3} – глубины дефектного (разрушенного) слоя, соответственно, после операций чернового шлифования, чистового шлифования, механического полирования; $Z_{мех}, Z$ – суммарные припуски, соответственно, на механическую обработку и общий суммарный

Из (1) видно, что распределение припуска, позволившее сократить количество операций без ущерба качеству, может существенно снизить себестоимость обработки, поэтому и важна задача рационального разбиения припуска при решении задачи оптимизации. Как было сказано выше, разбиение припуска осуществляется исходя из равенства вносимых и внесенных на предыдущих операциях дефектов. Глубину их проникновения можно оценить, используя функцию:

$$h_d = f(D), \quad (8)$$

где D – средний размер обработочных дефектов; $D = f(P_y)$, $D < D_{дон}$; h_d – предельная глубина, за которой размеры дефектов не превышают $D_{дон}$.

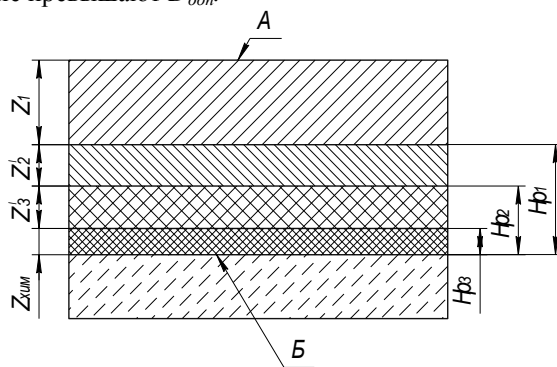


Рисунок 3 – Схема рационального перераспределения припуска по операциям (переходам): А и Б – поверхности заготовки и обработанного изделия, соответственно; H_{p1} – разрушенный (дефектный) слой, оставшийся после черновой операции шлифования; H_{p2} – разрушенный слой, оставшийся после чистовой операции шлифования с наложением дефектов, оставшихся после черновой операции; H_{p3} – разрушенный слой, оставшийся после операции доводки с наложением дефектов от чернового и чистового шлифования; Z_1 – припуск, удаляемый на черновой операции; Z_2 – припуск, удаляемый на чистовой операции, включающий разрушенный слой с дефектами, оставшимися после чернового шлифования; Z_3 – припуск, удаляемый на операции доводки, включающий разрушенный слой с дефектами, оставшимися после чернового и чистового шлифования; $Z_{хим}$ – припуск, удаляемый при химическом травлении, включающий разрушенные слои с дефектами, оставшимися от механической обработки [1]

Величина (переменная) h_d отслеживает минимальную глубину, ниже которой не встречаются обработочные дефекты с величиной усредненного единичного дефекта, большего допустимого размера. Максимально допустимый средний размер дефектов принимается отдельно для каждого конкретного

случая, исходя из требований к качеству обработанной поверхности и условий последующей эксплуатации обрабатываемого изделия.

Увеличивая припуск, снимаемый за один проход на конкретной операции, можно добиться уменьшения общего числа проходов, однако увеличение глубины резания t способствует увеличению интенсивности удаления припуска и влечет за собой: повышение износа инструмента, снижение его стойкости, а также увеличение глубины образующегося дефектного слоя H_p , для удаления которого требуются дополнительные операции. Режимы шлифования (v, s, t) взаимосвязаны, оказывая противоречивое влияние на процесс обработки. При проектировании ТП необходимо одновременно оптимизировать режимы обработки и количество операций (переходов), необходимых для достижения требуемой точности размеров, при обеспечении требуемой (минимальной) остаточной дефектности.

Разбиение припуска по операциям (переходам) производилось одновременно с поиском оптимальных режимов шлифования на каждой из них по критерию минимума себестоимости обработки. При разбиении припуска считалось, что при шлифовании на первой «черновой» операции в результате удаления материала при глубине резания t_1 возникает нагрузка на изделие (в первую очередь определяемая величиной радиальной составляющей силы резания P_y), которая вызывает образование обработочной дефектности глубиной h_{ocm1} . На второй операции (переходе) происходит удаление материала при глубине резания t_2 , вследствие чего вносится дефектность на глубину h_{ocm2} . При этом глубина распространения дефектов h_{ocm2} может превышать h_{ocm1} (рисунок 4, а) или распространяться на меньшую глубину (рисунок 4, б).

После каждой i -ой операции (переходе) глубина проникновения обработочной дефектности h_{ocm} принималась равной:

- глубине проникновения обработочной дефектности, возникшей на последней операции $h_{ocm i}$, если она перекрывала дефектность от предыдущей операции (см. рисунок 4, а), то есть $h_{ocm} = h_{ocm i}$;
- глубине проникновения дефектности на предыдущей операции $h_{ocm (i-1)}$ с вычетом удаленного на последней операции припуска t_i (см. рисунок 4, б), то есть $h_{ocm} = h_{ocm (i-1)} - t_i$.

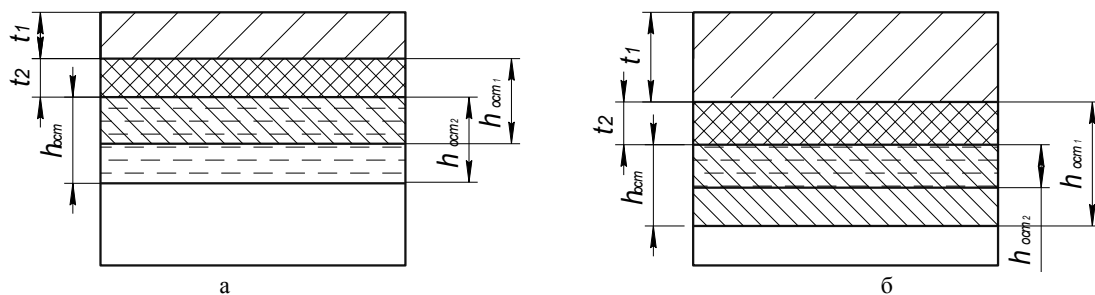


Рисунок 4 – Схема учета остаточной дефектности после выполнения всех операций

Решение задачи (разбиение припуска по операциям) должно отвечать следующим требованиям: 1 – глубина проникновения остаточной обработочной дефектности h_{ocm} должна быть меньше допустимой глубины проникновения дефектов $h_{дон}$ (что связано с последующими операциями химического травления и ионного упрочнения); 2 – режимы резания (v, s, t) на всех операциях должны обеспечивать достижение минимума себестоимости обработки. Для этого исследовалась целевая функция (1) с учетом ограничений, упрощенно приведенных в зависимостях (7):

$$\begin{cases}
 v_{\min cm} \geq v \geq v_{\max cm}; \\
 s_{\min cm} \geq s \geq s_{\max cm}; \\
 N_v = \frac{P_z \cdot v}{1000} \leq N_{v\theta}; \\
 N_s = \frac{P_z \cdot s}{1000 \cdot 60} \leq N_{s\theta}; \\
 P_z = C_{Pz} \cdot v^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma \leq P_{донPz} \quad C_{Pz}, \alpha, \beta, \gamma = f(\text{COTC}); \\
 P_y = C_{Py} \cdot v^{\alpha1} \cdot s^{\beta1} \cdot t^{\gamma1} \leq P_{донPy} \quad C_{Py}, \alpha1, \beta1, \gamma1 = f(\text{COTC}); \\
 \theta = C_\theta \cdot v^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma \leq \theta_{дон}, \quad C_\theta, \alpha, \beta, \gamma = f(\text{COTC}) \\
 D = f(P_y) \leq D_{дон}; \\
 h_{ocm} \leq h_{ocm-дон}
 \end{cases} \quad (7)$$

Для этого при решении задачи нужно одновременно варьировать переменными, число которых зависит от выбранного при расчете количества операций (переходов, проходов). То есть, при решении задачи для условия удаления припуска за два перехода решение состоит в нахождении шести переменных ($v_1, s_1, t_1; v_2, s_2, t_2$).

При решении задачи оптимизации, связанной с исследованием представленных зависимостей, которые имеют вид кусочно-гладкой функции, аналитическое выражение построить невозможно. Решение такой задачи реализуется лишь с помощью методов нелинейного программирования. Для этого использовались методы: штрафных функций, деформируемого многогранника и поиска по сетке [4].

С помощью метода штрафных функций задача с ограничениями сводилась к задаче безусловной оптимизации (без ограничений). Для предотвращения опасности нахождения локального минимума создавалась сетка в предполагаемой области определения функции. После, с помощью метода деформируемого многогранника, находилось решение, исходя из начальных условий каждого узла сетки, и выбиралось наименьшее. Решение задачи оптимизации реализовано в программной среде Delfi 7.0.

При помощи представленной методики в виде программы были рассчитаны режимы шлифования на двух операциях, применение которых обеспечивает снижение технологической себестоимости шлифования на 52% в сравнении с обработкой на производстве.

Представленная методика позволяет осуществлять расчет оптимальных режимов шлифования изделий из ХНМ по критерию минимума технологической себестоимости обработки при обеспечении требуемого качества обработанной поверхности (по величине линейных размеров дефектов, вызванных обработкой).

Дальнейшее развитие методики разбиения припуска по операциям и поиска оптимальных по критерию минимума технологической себестоимости режимов обработки позволит использовать её для широкого спектра оборудования и инструмента, и может быть рекомендовано для решения различных производственных задач.

Библиографический список использованной литературы

1. Калафатова Л.П. Технологические основы повышения эффективности обработки и обеспечения качества изделий из технических стекол и ситаллов: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 / Калафатова Людмила Павловна. — Донецк, 2001. — 356 с.

2. Разработка методов обеспечения надежности технологических процессов механической обработки труднообрабатываемых материалов и средств их реализации: отчет о научно-исследовательской работе/ [В.В. Бурмистров, П.Г. Матюха, Л.П. Калафатова и др.]. — Донецк: ДонНТУ, 1990. — 85 с.

3. Калафатова Л.П. Влияние режимов обработки на температурные и силовые параметры процесса шлифования ситалла / Л.П. Калафатова, С.А. Поезд // Современные технологии в машиностроении: сб. науч. ст. / под ред. А.И. Грабченко. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. — С. 43–50.

4. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. — М: Высшая школа, 2005. — 544 с.

Поступила в редакцию 10.06.2010 г.

Калафатова Л.П., Поезд С.А. Оптимізація технологічного процесу шліфування ситалів

Розглянуті питання мінімізації собівартості шліфування виробів із важкооброблюваних неметалевих матеріалів на прикладі ситалів при забезпеченні потрібної якості обробленої поверхні.

Ключові слова: оптимізація, собівартість, режими шліфування, розподіл припуску.

Kalafatova L.P., Poyezd S.A. Optimization of the technological process of polishing glass ceramics

The problems of minimizing the cost of polishing nonmetallic materials, for example, glass ceramics while ensuring the required quality of the machined surface are considered.

Keywords: optimization, cost, regime of polishing, distribution of allowance.