

Оптические и терморadiaционные характеристики теплоизолированных стенок и элементов камеры сгорания быстроходных дизелей

д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Мерзликин В.Г., к.ф.-м.н. доц. Сидоров О.В.,
к.т.н. Бекаев А.А., к.т.н. с.н.с. Суругин В.Г.
МГТУ «МАМИ», ФГУП ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга
(495) 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. Предметом данного исследования является анализ влияния оптических и терморadiaционных характеристик на нестационарные (стационарные) температурные распределения в полупрозрачных (ПТИП) или непрозрачных (ТИП) теплоизолирующих покрытиях для терморегулирования и контроля температуры стенок и элементов камеры сгорания быстроходных дизелей. Разработанная авторами методология физического и математического моделирования процессов лучистого теплопереноса была использована для вычисления оптимального баланса оптических и терморadiaционных характеристик покрытий как селективно поглощающих и рассеивающих материалов с различными пропускательными, отражательными и испускательными способностями в зависимости от диапазона длин волн облучающих или излучающих потоков тепла. Статья представляет математическое моделирование оптимального баланса улучшенных оптических (коэффициенты пропускания, отражения, поглощения или показатели поглощения, рассеяния) и терморadiaционных (коэффициенты испускания, излучения) характеристик. Рассмотрен эффект подповерхностного объемного нагрева, который при своем проявлении способствует снижению поверхностного перегрева покрытий камеры сгорания. Были получены численным способом нестационарные температурные распределения для полупрозрачных, защищающих металлическую подложку (стенку камеры сгорания) с различным отражением лучистого потока, пропущенного теплоизолирующим полупрозрачным покрытием. Было показано уменьшение температуры поверхности полупрозрачного ПТИП в сравнении с температурой непрозрачного покрытия. Предлагаются способы улучшения тепловой изоляции камеры сгорания двигателей внутреннего сгорания с использованием теплоизолирующих покрытий с высоким объемным отражением $r_\lambda > 60-80\%$ для тепловой защиты от интенсивного излучения раскаленных частиц сажи ($\lambda \sim 0.7-2$ мкм) и большой излучательной способностью $\epsilon_\lambda > 80-90\%$ ($\lambda > 4 - 5$ мкм) для противодействия нагреву конвективными потоками тепла внутри КС дизеля.

Ключевые слова: быстроходные дизельные двигатели, температурные нагрузки на элементы камер сгорания, полупрозрачные и непрозрачные теплоизолирующие покрытия, оптические и терморadiaционные характеристики.

Разработка теплозащиты элементов и узлов двигателей и турбин, термостойких лопаток и лопастей газотурбинных двигателей, камер сгорания быстроходных дизелей (а в недавнее время квазиadiaбатных двигателей), камер сгорания ДВС с самовоспламенением гомогенной топливно-воздушной смеси вызвало необходимость применения высокотемпературных и термостойких керамических покрытий [1 - 6]. В составе суммарного теплового потока присутствует проникающая лучистая компонента, достигающая 50%, что обуславливает поиск полупрозрачных теплоизолирующих материалов и покрытий с широкой полосой прозрачности [5 - 8].

При решении вопросов теплообмена в камерах сгорания ДВС теплоизолирующие покрытия обычно представлялись как непрозрачные материалы. Но при наличии интенсивного лучистого нагрева они должны рассматриваться как оптически неоднородные среды, в кото-

рых надо учитывать ряд новых явлений [5 - 9]. В таких полупрозрачных материалах возникает подповерхностное рассеяние и отражение, существенный объемный прогрев, обуславливающий смещение температурного максимума нагрева в подповерхностном слое, проявляются эффекты фокусировки проникающего излучения, а потери тепла на облучаемой поверхности влияют на установление температурного распределения и формирование направления стока кондуктивных и конвективных потоков.

В данной работе рассматривается двухслойная модель материала в виде металлической подложки с нанесенным слоем теплоизолирующего полупрозрачного (непрозрачного) покрытия толщиной H при общей толщине H_{Σ} . Данное покрытие исследуется в условиях эксплуатации теплоизолированной камеры сгорания быстроходного дизеля с частотой вращения не менее 2000 мин^{-1} . Значения времени сгорания топливной смеси («горячая фаза») и последующих трех тактов движения поршня - охлаждения («холодная фаза») принимались равными 0.001 с и 0.003 с . В качестве характеристик внешних условий нагрева были использованы экспериментальные данные [1, 2], включающие временные зависимости: (1) потока излучения раскаленных частиц сажи $q_0(t)$ в пределах изменения от 0 до 1.9 МВт/м^2 (при 50% вкладе в суммарный поток тепла); (2) температуры $T_A(t) = 300^\circ\text{К} \dots 1900^\circ\text{К}$ и (3) излучательной способности $\varepsilon_{ef}(t) = 0.2 \dots 0.65$ топливно-воздушной смеси, (4) коэффициента турбулентной теплоотдачи $\alpha_T(t) = 0 \dots 2900 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ за время «горячей» фазы 0.001 с внутри камеры сгорания.

Отличительной особенностью данного исследования является рассмотрение теплоизолирующего покрытия как селективно поглощающих и рассеивающих материалов с различными пропускательными, отражательными и испускательными способностями в зависимости от диапазона длин волн: коротковолнового $\lambda \sim 0.7\text{-}2 \text{ мкм}$ и длинноволнового $\lambda > 4 - 5 \text{ мкм}$. Вводимые оптические терморрадиационные характеристики теплоизолирующих покрытий рассматривались как не зависящие от температуры нагрева.

При использовании двухпоточковой модели переноса излучения [5 - 9] вводятся следующие оптические параметры: отражательная способность полубесконечного слоя H_{∞} рассеивающего материала – альбедо $A = \frac{b - \kappa}{b + \kappa}$; показатель экстинкции $b = \sqrt{\kappa^2 + 2 \cdot \kappa \cdot \sigma}$ - физическая величина, пропорциональная интегральным сечениям рассеяния, поглощения в рамках теории рассеяния Г.Ми [9, 10]. Были разработаны оптические модели теплоизолирующих полупрозрачных ПТИП и непрозрачных ТИП покрытий. Используя методику оценки оптических параметров полупрозрачных материалов [5, 10], рассчитаны коэффициенты отражения $r_{se}(H)$, пропускания $\tau_{se}(H)$ и поглощения $a_{se}(H)$, функция внутреннего теплового источника $F_{se}(x, t, b, A, q_0(t), H)$ полупрозрачного плоского слоя толщиной H с координатой $0 \leq x \leq H$ при решении неоднородного уравнения теплопроводности для температуры T_{se} ПТИП (T_{me} для температуры металлической подложки) со следующими граничными условиями на облучаемой поверхности [9, 10]:

$$-K_T \frac{\partial T_{se}(x=0, t)}{\partial x} = \alpha_T(t) \cdot (T_A(t) - T_{se}(0, t)) + \varepsilon_{ef}(t) \cdot c_0 (T_A(t)^4 - T_{se}(0, t)^4),$$

где: $\varepsilon_{ef}(t) = \left(\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_A(t)} - 1 \right)^{-1}$ – эффективная излучательная способность покрытия в камере сгорания с соответствующими значениями излучательной способности для сгораемой топливной смеси и стенки, равными $\varepsilon_A(t), \varepsilon_w$;

c_0 – коэффициент Стефана-Больцмана;

теплофизические характеристики:

$K_T = 2.7 \text{ Вт/(мК)}$, - теплопроводность;

$c = 450 \text{ Дж/(кг К)}$ – теплоемкость;

$\rho = 4030 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала теплоизолирующих как полупрозрачных, так и непрозрачных покрытий.

Граничные условия на фронтальной поверхности для полупрозрачных покрытий определяются влиянием конвективных и только длинноволновых ($\lambda > 4 - 5 \text{ мкм}$) потоков собственного тепла и воздействующих непроникающих потоков излучения газового объема камеры сгорания. Коротковолновая ($\lambda \sim 0.7\text{-}2 \text{ мкм}$) составляющая общего лучистого потока входит в состав функции теплового источника $F_{se}(x, t)$.

На тыльной (фронтальной поверхности металлической подложки с коэффициентом отражения R_{me} и теплофизическими параметрами $c_{me} = 450 \text{ Дж/(кг К)}$, $K_{Tme} = 76 \text{ Вт/(м К)}$, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$) границе полупрозрачного ПТИП покрытия задается условие дополнительного источника тепла за счет проникновения сквозь слой толщиной $x = H$ полупрозрачного покрытия внешнего лучистого потока:

$$\frac{\partial T_{me}}{\partial x}(x = H^+) = \frac{\partial T_{se}}{\partial x}(x = H^-) = \frac{q_0(t) \cdot (1 - R_{me}) \cdot \tau_{se}}{1 - R_{me} \cdot r_{se}}.$$

Рассматриваемая двухслойная модель покрытия, нанесенного на металлическую подложку (стенку камеры сгорания дизеля), обеспечивается конвективным охлаждением с температурой T_{ex} на внешней границе $x = H_{\Sigma}$ металлической стенки камеры сгорания:

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x = H_{\Sigma}) = \alpha_T(t) \cdot (T(H_{\Sigma}) - T_{ex}).$$

Для решение однородного уравнение теплопроводности для непрозрачного теплоизолирующего покрытия с температурой T_{op} граничное условие на облучаемой поверхности имеет вид:

$$-K_T \cdot \frac{\partial T_{op}(0, t)}{\partial x} = \alpha_T(t) \cdot (T_A(t) - T_{op}(0, t)) + \varepsilon_{ef}(t) \cdot c_0 \cdot (T_A(t)^4 - T_{op}(0, t)^4) + q_0(t) \cdot (1 - R_{op}),$$

где: $R_{op} = 20\%$ - коэффициент поверхностного отражения (по закону Френеля).

Представленная физико-математическая модель позволяет вычислять температурные и радиационные поля для модельных слоев полупрозрачных или непрозрачных покрытий в условиях эксплуатации реальных камер сгорания высокоскоростных дизелей. Были проведены расчетно-теоретические оценки температурных распределений в плоской слое теплоизолирующего керамического (на основе стабилизированного диоксида циркония) покрытия толщиной 0.5 мм, нанесенного на металлическую подложку (стенку камеры сгорания толщиной 0.5 см) с внешним конвективным охлаждением с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_T = 200 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ [2]. Сложный теплообмен в камерах сгорания быстроходных дизелей вызывает существенный поверхностный нагрев для непрозрачных покрытий $(T_{op})_{\max} \sim 360^\circ\text{К}$ (рисунок 1,а). В этот период «горячей» фазы (горения топливно-воздушной смеси) через 0.0006 с температура поверхности полупрозрачного ПТИП покрытия достигает $(T_{sel})_{\max} \sim 350^\circ\text{К}$. Существенный выигрыш в 10°К обусловлен улучшенным температурным распределением в подповерхностной области облучаемого керамического ПТИП покрытия, которое обладает полосой «прозрачности» до 3-4 мкм для действующего излучения раскаленных частиц сажи [5]. Результаты физико-математического моделирования свидетельствуют, что, для того чтобы снизить перегрев на поверхности непрозрачных покрытий, необходимо, прежде всего, обеспечить оптимальный баланс оптических характеристик: показателей поглощения $\kappa \sim 10\text{-}30 \text{ м}^{-1}$ и рассеяния $\sigma \sim 100\div 3000 \text{ м}^{-1}$ при изменении коэффициентов отражения в интервале 5% - 60% и пропускания - 40%- 94% для данного слоя в 0.5 мм. Заметим, что коэффициент отражения для полубесконечного слоя ПТИП будет составлять величину $A \sim 50\div 94\%$, что позволяет при необходимости наращивать толщину ПТИП для увеличения отражения лучистой компоненты и снижения температуры поверхности.

Граничные условия конвективно-лучистой тепловой нагрузки определены на рисунке

1, а именно: временное распределение температуры на облучаемой (фронтальной) (а) и тыльной поверхностях (б) для теплоизолирующих полупрозрачных ПТИП (T_{se1} , T_{se2} , T_{se3}) с объемным отражением, обусловленным показателями поглощения $\kappa = 30 \text{ м}^{-1}$ и рассеяния $\sigma = 100, 500, 3000 \text{ м}^{-1}$ оптических моделей М1, М2, М3, и непрозрачных ТИП (T_{op}) покрытий толщиной $H = 0.5 \text{ мм}$ (с собственной излучательной способностью $\varepsilon_w = 0.98$, начальной температурой $T_0 = 300^\circ\text{К}$) в период нагрева за один цикл 0.004 (время «горячей» фазы - 0.001 с) при движении поршня в камере сгорания быстроходного двигателя.

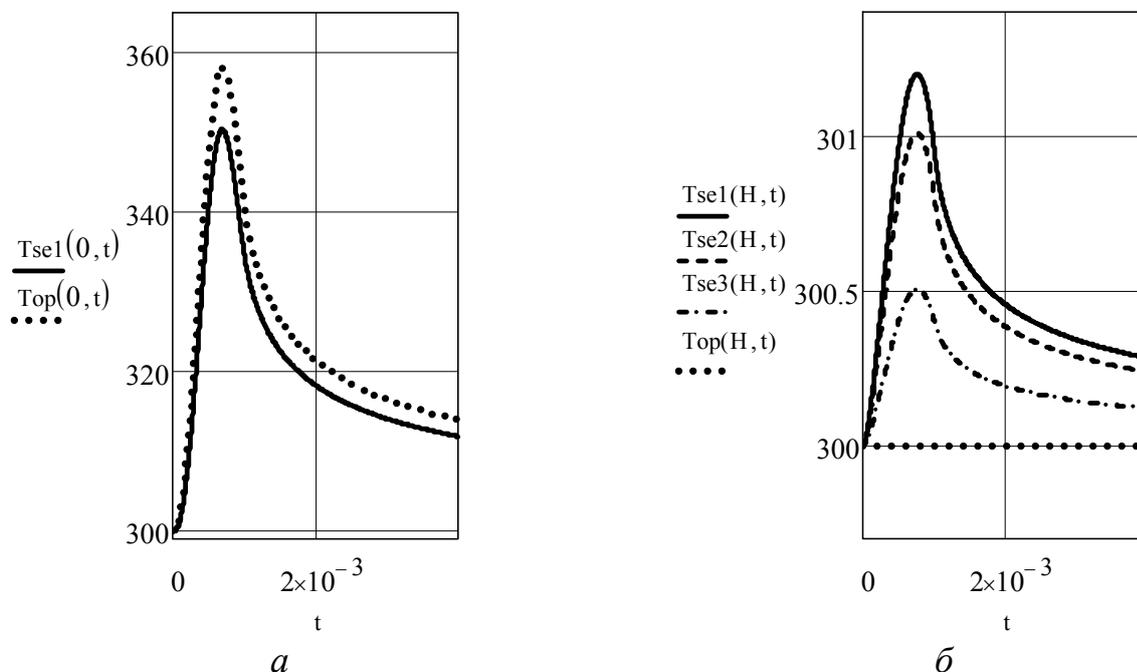


Рисунок 1 – Временное распределение температуры на облучаемой (фронтальной) (а) и тыльной поверхности (б) для теплоизолирующих полупрозрачных ПТИП

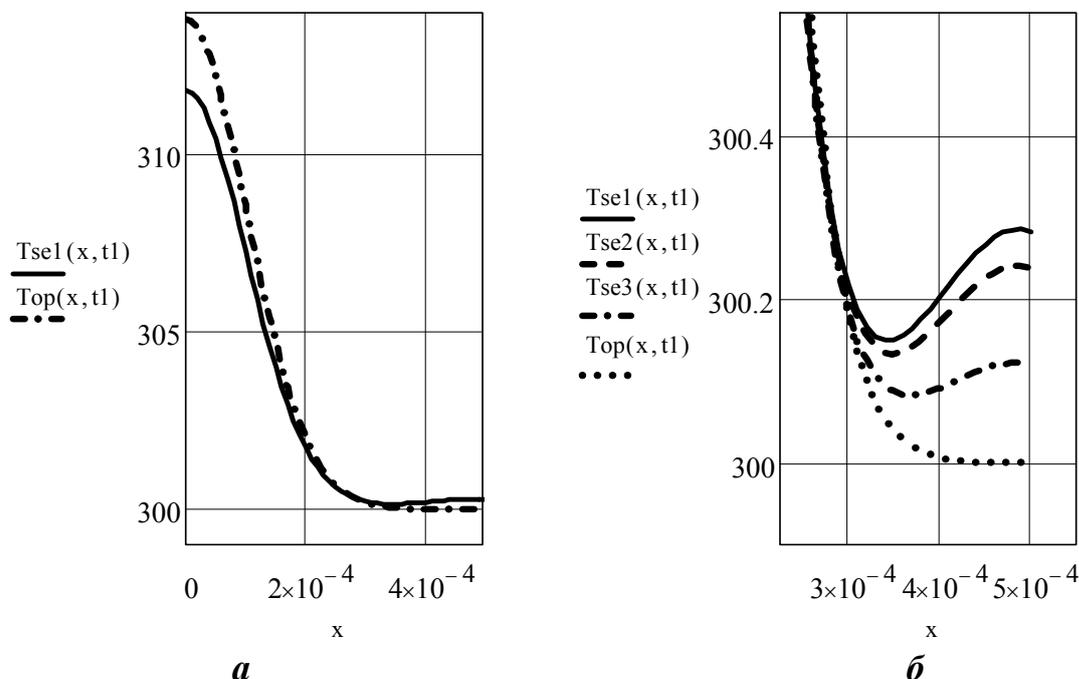


Рисунок 2 – Распределение температуры в толще полупрозрачных ПТИП T_{se1} , T_{se2} , $T_{se3}(x, t_1)$ и непрозрачных $T_{op}(x, t_1)$ покрытий за время $t_1 = 0.004$ одного цикла движения поршня

На рисунке 1,б представлено временная зависимость температуры на тыльной поверхности полупрозрачного ПТИП и непрозрачного покрытий. За время одного цикла движения поршня 0.001 с температура нагрева непрозрачного покрытия не изменится. Для полупрозрачных покрытий естественен всплеск температуры от кондуктивного стока тепла из области подповерхностного нагрева полупрозрачного ПТИП, а также за счет перетекания тепловой энергии от границы покрытия с подложкой, на которой поглощается пропущенный внешний лучистый поток, пропорциональный коэффициенту поглощения $(1-R_{me})$. Изменение коэффициента пропускания полупрозрачного ПТИП покрытия τ_{se} в пределах 47%, 83% и 94% вызывает последовательное приращение ΔT температуры нагрева на его тыльной поверхности от 300,1°K до 300,3°K за время одного такта нагрева 0.001 с и трех тактов охлаждения 0.003 с (рисунок 1,б; рисунок 2).

Температурные распределения в толще полупрозрачного и непрозрачного покрытий показывают, что за счет увеличения коэффициента отражения ПТИП r_{se} от 5% до 60% (оптические модели М1, М2 и М3) удастся весь температурный профиль «опустить», уменьшая не только температуру на поверхности на 2-3°K градуса, но и на тыльной границе данного покрытия на величину до 0,3°K за весь цикл движения поршня.

Эти результаты подтверждаются расчетно-теоретическими оценками температурных режимов для теплозащитных покрытий, используемых для объектов аэрокосмической техники [4, 7]. В работе [7] указано, что применение полупрозрачных покрытий (на основе диоксида циркония) снижает температуру нагрева их корпусов летательных аппаратов в 2 раза в сравнении с использованием непрозрачных покрытий и материалов.

Таким образом, существенное изменение температуры поверхности теплоизолирующего полупрозрачного покрытия напрямую определяется высоким рассеянием, низким поглощением, обуславливающим рост коэффициента отражения оптически неоднородного слоя на десятки процентов.

При росте коэффициента поглощения непрозрачной подложки температура фронтальной (обучаемой) поверхности ПТИП изменяется незначительно, в пределах одного градуса при данных характеристиках сложного теплообмена в камере сгорания. Но становится существенным внутренний перегрев, вызывающий увеличение температуры на тыльной поверхности ПТИП или на фронтальной поверхности металлической подложки на 50-100%.

Еще одной характеристикой, влияющей на температурное распределение в толще как полупрозрачных ПТИП, так и непрозрачных покрытий, является его собственная излучательная способность. В коротковолновом интервале длин волн $\lambda \sim 0.7-2$ мкм эта величина незначительна на фоне интенсивного облучения покрытий в камере сгорания в ближнем ИК-диапазоне. В длинноволновой $\lambda > 4 - 5$ мкм области поток терморрадиации (по Планку) соответствует температуре, не превышающей температуру поверхности 400-500°K, которая достигается при интенсивном конвективном тепловом воздействии. В этом спектральном интервале большинство материалов уже обладают достаточно высокой собственной излучательной способностью со значением не менее $\varepsilon_w > 70-80\%$, которая может быть увеличена за счет специальной обработки облучаемой поверхности покрытий [4, 8]. Как показали расчетные оценки, для данных модельных условий конвективно-лучистого нагрева в камере сгорания быстроходных дизелей температура поверхности внутренних стенок за время одного цикла движения поршня в камере сгорания изменялась в пределах одного градуса при предельном увеличении $\varepsilon_w \rightarrow 1$.

Литература

1. Rakopoulos C.D., Giakoumis E.G. Diesel Engine Transient Operation. Principles of Operation and Simulation Analysis. e-ISBN 978-1-84882-375-4. Springer-Verlag London Limited. 2009. - 390 p.p.
2. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учебное пособие для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - С. 592.

3. Абраимов Н.И. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. М. Машиностроение. 1993. -336 с.
4. Поклад В. А. и др. Патент № 2007146968, 2007.
5. Мерзликин В.Г., Гутиеррес Охеда М., Безделкин В.В., Сидоров О.В., Сутугин В.Г. Полупрозрачная теплоизоляция для адиабатного дизеля (Новая концепция). Москва. Журнал автомобильная промышленность, № 7, стр. 34-36, 2007.
6. Мерзликин В.Г., Товстоног В.А., Гутиеррес Охеда М. Теплоизолирующее покрытие. Патент РФ № 2 323 357, 2006 г.
7. Siegel. R. Internal Radiation Effects in Zirconia Thermal Barrier Coatings, AIAA J. Thermophysics Heat Trans. 1996. - Vol. 10, no. 4, p. 707-709.
8. Manara J., Arduini-Schuster M., Rätzer-Scheibe H.-J. and Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings. Surface and Coatings Technology. 2009.- Vol. 203, Issue 8, 15 January, p. 1059-1068.
9. Товстоног В.А., Мерзликин В.Г., Мосолов Ф.Ф. Постановка и решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойных рассеивающих средах. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2008, №2, с. 12- 27.
10. Merzlikin V.G., Sidorov O.V., Cheranov S.V., Rettberg R. Development of principles and methods of estimation of thermal condition of semitransparent coatings in complex heat exchange combustion chambers for low-heat-rejection diesel engines. FISITA World Automotive Budapest, 30 May – 4 June 2010. Book of Abstracts, 2010. P.198. Congress CD-ROM, paper № F2010-C081, p.p. 8.

Шлифование инструментальных материалов высокопористыми абразивными кругами

к.т.н. Полканов Е.Г., к.т.н. Пини Б.Е.
ММПП Салют, МГТУ «МАМИ»
(495) 223-05-23, доб. 1327

Для повышения производительности и качества шлифования сложнопрофильных инструментов, изготавливаемых из высококачественных инструментальных сталей, в статье рекомендуются высокопористые шлифовальные круги. Лабораторные и производственные испытания таких шлифовальных кругов, проведенные на ФГУП ММПП «Салют», показали высокую эффективность их использования для указанных целей.

Ключевые слова: шлифование сложнопрофильных инструментов из высококачественных инструментальных сталей, высокопористые шлифовальные круги.

При изготовлении сложнопрофильного режущего инструмента из быстрорежущих сталей и из твердого сплава выполняются разнообразные операции шлифования, в том числе вышлифовывание канавок по целому.

В авиастроении используется большое количество специального режущего инструмента, предназначенного для обработки разнообразных по форме поверхностей деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемых материалов. Поэтому качество и размерная стойкость режущих инструментов играют существенную роль в обеспечении экономичного изготовления деталей. Существенное влияние на качество инструментов оказывает использование станков с программным управлением, в том числе пятикоординатных шлифовальных станков. Такие станки позволяют выполнять сложный комплекс обработки с одного установка заготовки инструмента. При этом, как показывает опыт, для шлифования сложнопрофильных поверхностей режущих инструментов наиболее перспективным направлением является использование высокопористого абразивного инструмента, который обладает рядом сущест-