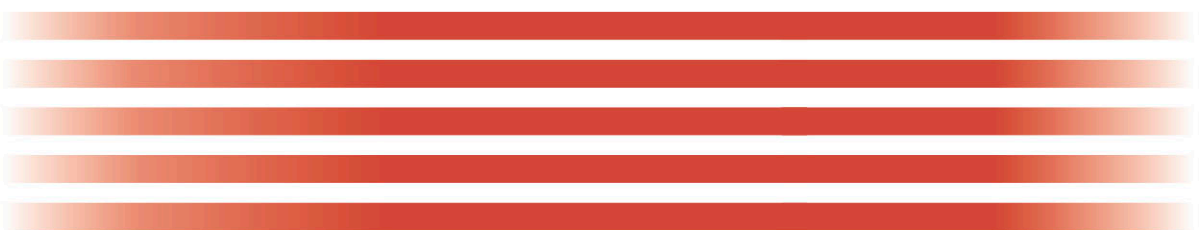




# ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

при производстве  
деталей



УДК 621.793.71:621.81

**Формирование** газотермических покрытий при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Харламова и М. Л. Хейфеца ; Нац. акад. наук Беларуси, Отд. физ.-техн. наук, Нац. акад. наук Украины, Ин-т сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 416, [2] с. – ISBN 978-985-08-2629-9.

Рассмотрены технологии создания высокопрочных покрытий на изделиях методами газотермического напыления. Проанализированы современные подходы к подготовке поверхностей изделий под напыление, основные представления о процессе формирования покрытий, закономерности формирования сплэтов и особенности процессов механической обработки изделий с напыленными покрытиями.

Предназначена для научных сотрудников и инженеров, работающих по направлениям повышения качества поверхностей деталей машин.

Табл. 47. Ил. 220. Библиогр.: 261 название.

**А в т о р ы:**

С. А. Клименко, Л. Г. Полонский, М. Ю. Харламов, Ю. А. Харламов (*Украина*),  
П. А. Витязь, В. С. Ивашко, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик (*Беларусь*)

**Р е ц е н з е н т ы:**

академик НАН Беларуси, доктор технических наук,  
профессор Е. И. Марукович,  
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук,  
профессор Ф. И. Пантелеенко

**ISBN 978-985-08-2629-9**

© Коллектив авторов, 2020  
© Оформление РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2020

Надлежащая подготовка поверхности детали является важным этапом получения газотермических покрытий высокого качества для исполнения требуемых функций [1–4]. Без надлежащей подготовки поверхности возрастает вероятность отказа покрытия, поскольку прочность сцепления в большой мере зависит от чистоты, шероховатости и других параметров состояния поверхностного слоя. Основными факторами, определяющими выбор способа подготовки поверхности, являются материалы покрытия, основы и их свойства.

При отработке конструкции детали на технологичность не допускается наличие на краях обработанного покрытия острых кромок, которые являются концентраторами напряжений и способствуют образованию трещин при нагружении (рис. 1.1). Покрытие в концевой части детали должно иметь скошенную кромку (рис. 1.1, в).

Правильная подготовка поверхности основы перед напылением имеет важное значение для адгезии покрытий и должна быть выполнена в кратчайшие сроки до напыления. Подготовка поверхности состоит из трех этапов:

– *очистки*, которая является первым шагом для удаления загрязнений, таких как масло, смазки, краска, ржавчина, окалина и влага. Эта операция довольно обычная, но очень существенная;

– *придания шероховатости*, что имеет решающее значение для оптимальной адгезии покрытия к основе. Степень шероховатости должна быть совместима со средним размером сплэтов: средний диаметр сплэта должен быть примерно в 2,5 раза больше высоты пиков  $Rt$  ( $Rz$ ) и расстояние между пиками должно быть достаточным для проникновения капли напыляемой частицы между ними. Среднеквадратичное значение  $R_{\Delta q}$  представляется параметром шероховатости, который наилучшим образом коррелирует с адгезией покрытия. Придание шероховатости может быть достигнуто различными методами. Степень ше-

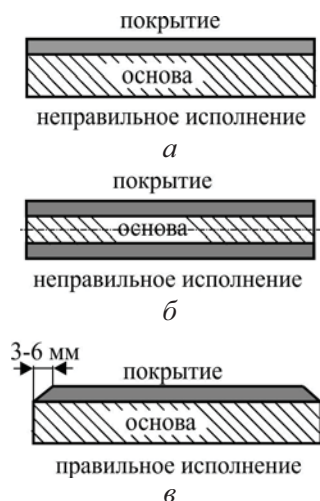


Рис. 1.1. Концевые элементы плоских (а, в) и цилиндрических (б, в) деталей с покрытиями [1, 5]

роховатости, содержание остаточного абразива и вызванных обработкой напряжений зависит от системы обработки, используемого оборудования, условий обработки – давления струи (важно для машин нагнетательного), дистанции обработки (должна быть оптимизирована), материала и размера абразива. Так как частицы абразива могут разрушаться во время обработки, используемый абразив должен постоянно просеиваться, а мелкие частицы – отбрасываться, чтобы сохранить строгий контроль над единообразием и степенью шероховатости;

– *удаления адсорбатов и конденсатов*, которое выполняется либо путем предварительного нагрева основы, обычно напылительной горелкой, до температур, при которых они испаряются, или путем струйной обработки основы сухим льдом непосредственно перед пятном напыления, или с помощью лазера, сфокусированного выше по течению от точки напыления. Подогрев основы, безусловно, наиболее часто используется в промышленных масштабах.

В любом случае, независимо от используемой техники, очистка, придание шероховатости и устранение адсорбатов и конденсатов – ключевые факторы для достижения хороших адгезионных свойств.

### **1.1. Предварительная механическая обработка**

Технологический процесс изготовления деталей с покрытиями охватывает стадии:

- изготовления исходной заготовки;
- подготовки поверхности заготовки под напыление;
- формирования покрытия;
- механической обработки детали до требуемого размера.

Для определения размеров исходной заготовки детали под напыление необходимо знать толщину слоя покрытия и оценить величину припуска на механическую обработку детали с покрытием.

Обычно за расчетную величину припуска применяют минимальный припуск, достаточный для устранения на выполняемом переходе погрешностей обработки и дефектов поверхностных слоев (высот неровностей профиля, глубины дефектного слоя, суммарного отклонения расположения поверхностей, погрешностей установки детали в приспособлении), сформированных на предыдущих переходах или операциях.

В первом приближении расчет технологических припусков и величины наращенного слоя для упрочнения или восстановления детали может быть выполнен расчетно-аналитическим методом или согласно таблицам. Расчет проводят после того, как предварительно выбран метод нанесения покрытия и намечен маршрут механической обработки поверхности с покрытием. Схема расположения общих и межоперационных припусков и допусков при упрочнении или восстановлении деталей для условий индивидуального производства приведена на рис. 1.2.

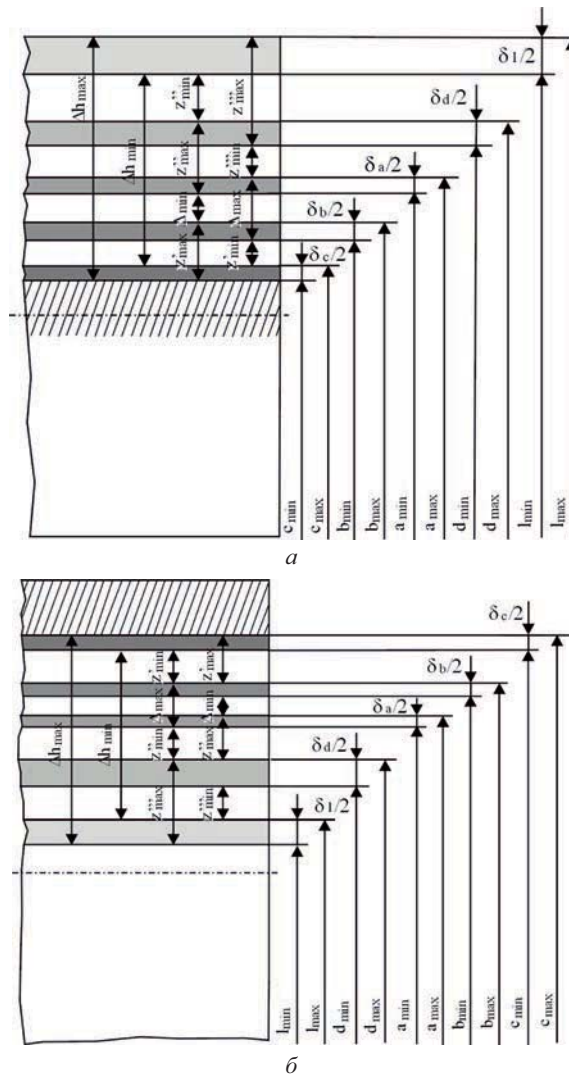


Рис. 1.2. Схема графического расположения припусков и допусков при упрочнении или восстановлении детали для вала (а) и отверстия (б):  $a_{\min}, a_{\max}$  – минимальные и максимальные заданные размеры детали, мм;  $b_{\min}, b_{\max}$  – минимальные и максимальные размеры детали после выхода из строя, мм;  $c_{\min}, c_{\max}$  – минимальные и максимальные размеры детали после предварительной механической обработки перед восстановлением, мм;  $d_{\min}, d_{\max}$  – минимальные и максимальные промежуточные размеры, полученные после черновой механической обработки, мм;  $l_{\min}, l_{\max}$  – минимальные и максимальные исходные размеры упрочненной или восстановленной детали, мм;  $T_a, T_b, T_c, T_d, T_l$  – допуски на размеры  $a, b, c, d, l$  соответственно, мкм;  $\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$  – величины минимального и максимального изменения размера детали при выходе ее из строя, мм;  $z'_{\min}, z'_{\max}$  – минимальный и максимальный припуски, удаляемые при предварительной механической обработке детали перед упрочнением или восстановлением, мм;  $z''_{\min}, z''_{\max}$  – минимальный и максимальный припуски, удаляемые при чистовой механической обработке упрочненной или восстановленной детали, мм;  $z'''_{\min}, z'''_{\max}$  – минимальный и максимальный припуски, удаляемые при черновой механической обработке упрочненной или восстановленной детали, мм;  $\Delta h_{\min}, \Delta h_{\max}$  – минимальная и максимальная толщины слоя покрытия, мм

Расчет припусков, граничных размеров по технологическим переходам и толщины покрытия выполняется в следующей последовательности.

1. Исходя из заданных и выбраковочных размеров детали, определяются величины минимального и максимального изменения размера детали при ее выходе из строя:

$$\Delta_{\max} = a_{\max} - b_{\max}; \quad (1.1)$$

$$\Delta_{\min} = a_{\min} - b_{\min}.$$

2. Для каждого технологического перехода записываются значения  $R_z$ ,  $h$ ,  $\Delta_\Sigma$ ,  $\varepsilon$  и  $T_d$ . Величина допуска на размер определяется по таблицам в зависимости от качества точности.

После предварительной механической обработки перед упрочнением или восстановлением определяются припуски и граничные размеры детали. В соответствии с рис. 1.2 получаем:

– для вала:

$$\begin{aligned} z'_{\min} &= 2 \left[ (R_{zb} + h_b) + \sqrt{\Delta_{\Sigma b}^2 + \varepsilon_c^2} \right]; \\ c_{\max} &= b_{\max} - 2z'_{\min}; \\ c_{\min} &= c_{\max} - T_c; \end{aligned} \quad (1.2)$$

– для отверстия:

$$\begin{aligned} 2z'_{\min} &= 2 \left[ (R_{zb} + h_b) + \sqrt{\Delta_{\Sigma b}^2 + \varepsilon_c^2} \right]; \\ c_{\min} &= b_{\max} - 2z'_{\min}; \\ c_{\max} &= c_{\min} + T_c. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Здесь и ниже индексы при значениях  $R_z$ ,  $h$ ,  $\Delta_\Sigma$  и  $\varepsilon$  показывают то, с учетом параметров качества (шероховатость поверхности, дефектный слой, пространственное отклонение и ошибка установки) каких поверхностей необходимо определить значения этих параметров.

3. Зная заданные размеры детали, а также величины  $R_z$ ,  $h$ ,  $\Delta_\Sigma$  и  $T_d$  по технологическим переходам, рассчитываются припуски и промежуточные размеры детали при механической обработке после ее упрочнения или восстановления.

4. Определяются припуски на чистовую механическую обработку упрочненной или восстановленной детали и ее граничные размеры после черновой обработки:

– для вала:

$$2z''_{\min} = 2 \left[ (R_{zd} + h_d) + \sqrt{\Delta_{\Sigma d}^2 + \varepsilon_a^2} \right];$$

$$\begin{aligned}
d_{\min} &= a_{\max} + 2z''_{\min}; \\
d_{\max} &= d_{\min} + T_d; \\
2z''_{\max} &= 2z''_{\min} + T_a + T_d;
\end{aligned}
\tag{1.4}$$

– для отверстия:

$$\begin{aligned}
2z''_{\min} &= 2 \left[ (R_{zd} + h_d) + \sqrt{\Delta_{\Sigma d}^2 + \varepsilon_a^2} \right]; \\
d_{\max} &= a_{\min} + 2z''_{\min}; \\
d_{\min} &= d_{\max} + T_d; \\
2z''_{\max} &= 2z''_{\min} + T_a + T_d;
\end{aligned}
\tag{1.5}$$

– для вала:

$$\begin{aligned}
2z''_{\min} &= 2 \left[ (R_{zd} + h_d) + \sqrt{\Delta_{\Sigma d}^2 + \varepsilon_a^2} \right]; \\
d_{\min} &= a_{\max} + 2z''_{\min}; \\
d_{\max} &= d_{\min} + T_d; \\
2z''_{\max} &= 2z''_{\min} + T_a + T_d;
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

– для отверстия:

$$\begin{aligned}
2z'''_{\min} &= 2 \left[ (R_{ze} + h_e) + \sqrt{\Delta_{\Sigma e}^2 + \varepsilon_d^2} \right]; \\
l_{\max} &= d_{\min} + 2z'''_{\min}; \\
l_{\min} &= d_{\max} - T_e; \\
2z'''_{\max} &= 2z'''_{\min} + T_d + T_e.
\end{aligned}
\tag{1.7}$$

5. Определяются припуски на черновую механическую обработку упрочненной или восстановленной детали и ее граничные размеры:

– для вала:

$$\begin{aligned}
2z'''_{\min} &= 2 \left[ (R_{ze} + h_e) + \sqrt{\Delta_{\Sigma e}^2 + \varepsilon_d^2} \right]; \\
l_{\min} &= d_{\max} + 2z'''_{\min}; \\
l_{\max} &= l_{\min} + T_e; \\
2z'''_{\max} &= 2z'''_{\min} + T_d + T_e;
\end{aligned}
\tag{1.8}$$

– для отверстия:

$$2z'''_{\min} = 2 \left[ (R_{ze} + h_e) + \sqrt{\Delta_{\Sigma e}^2 + \varepsilon_d^2} \right];$$

$$\begin{aligned}
 l_{\max} &= d_{\min} + 2z'''_{\min}; \\
 l_{\min} &= l_{\max} - T_e; \\
 2z'''_{\max} &= 2z'''_{\min} + T_d + T_e.
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

6. Определяется толщина слоя покрытия при упрочнении или восстановлении детали:

– для вала:

$$\begin{aligned}
 2\Delta h_{\min} &= l_{\min} - c_{\max}; \\
 2\Delta h_{\max} &= l_{\max} - c_{\min}.
 \end{aligned}
 \tag{1.10}$$

– для отверстия:

$$\begin{aligned}
 2\Delta h_{\min} &= l_{\max} - c_{\min}; \\
 2\Delta h_{\max} &= l_{\min} - c_{\max}.
 \end{aligned}
 \tag{1.11}$$

7. Проверяется корректность расчетов припусков на каждом переходе и толщинах покрытия:

$$\begin{aligned}
 2z'_{\max} - 2z'_{\min} &= T_b + T_c; \\
 2z'''_{\max} - 2z'_{\min} &= T_d + T_e; \\
 2z'_{\max} - 2z'_{\min} &= T_a + T_d; \\
 2h_{\max} - 2h_{\min} &= T_e + T_c.
 \end{aligned}
 \tag{1.12}$$

Указанный подход не позволяет учесть отклонения и дефекты на глубинах, превышающих толщину покрытия. Как вывод, нужно отметить, что назначение припусков на обработку поверхностей с покрытиями – трудоемкий процесс, который требует уточнения для обоснованного назначения размеров заготовки под нанесение покрытия.

Выше уже отмечалось, что не весь слой покрытия по толщине имеет стабильные свойства. Переходный слой между основным металлом и материалом покрытия отличается от материала покрытия: химическим составом, структурой и свойствами. Верхний слой может включать шлаки, остатки присадочного материала и различные дефекты. Применение в таких условиях расчетно-аналитического метода определения толщины покрытия не позволяет учесть качественные показатели покрытия. Это может привести к тому, что слой покрытия, предназначенный для обеспечения ресурса работы, окажется в зонах с пониженными механическими свойствами – переходной или верхней. В таких условиях работоспособность изделия с покрытиями снижается.

Чтобы обеспечить высокие эксплуатационные свойства деталей с покрытиями целесообразно использовать следующий подход [6]. На пробной заготовке наносится слой покрытия и производится послойное его удаление точением. После каждого прохода инструмента измеряется какой-либо показатель



качества поверхности, например, шероховатость или микротвердость, и строится соответствующий график изменения показателя по глубине покрытия. На графике выделяются три участка – верхний (I), средний (II) и переходный (III). Лучшими и стабильными параметрами качества характеризуется средний участок, который будет обладать и лучшими эксплуатационными показателями, в частности большей износостойкостью.

Таким образом, желательно, чтобы слой покрытия, определяющий работоспособность изделия, находился в среднем участке (II). В этом случае будет обеспечиваться максимальный ресурс работы изделия.

Определив размеры участка со стабильными показателями качества, и разместив в нем слой покрытия, обеспечивающий ресурс работы детали, с учетом известного переходного участка необходимо скорректировать размеры исходной заготовки под покрытие. После этого можно изготавливать детали с покрытиями и припуском под механическую обработку.

Таким образом, в зависимости от толщины покрытия  $h$  наиболее высокими и стабильными свойствами характеризуется участок покрытия на расстоянии  $h'$  от основы. Величину заготовки под нанесение покрытия следует назначать из соотношения

$$d_{\text{заг}} = d_{\text{дет}} - h', \quad (1.13)$$

где  $d_{\text{заг}}$ ,  $d_{\text{дет}}$  – диаметр заготовки и готовой детали соответственно.

Предварительная механическая обработка (токарная, фрезерная и пр.) позволяет получать поднутрения для размещения напыляемого покрытия. При отсутствии поднутрений покрытие никогда не должно резко заканчиваться на поверхности. В поднутрениях края должны быть скошены, и перед напылением следует удалить острые кромки. Фаски выполняют с углом около  $30^\circ$  (рис. 1.3, *a*). Острые углы улавливают не схватившиеся частицы напыляемого материала, пыль и другие загрязнения, что приводит к образованию пористых участков покрытия.

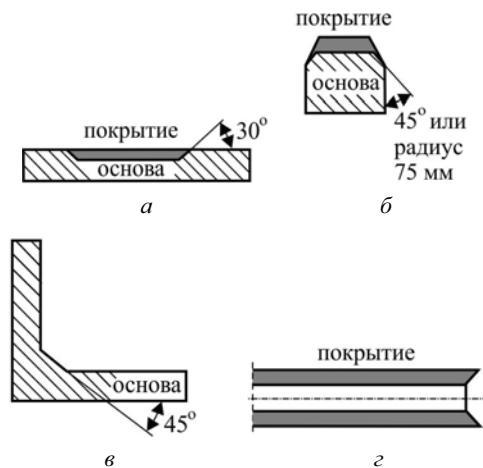


Рис. 1.3. Рекомендуемая механическая обработка напыляемых поверхностей:  
*a* – поднутрения на плоских деталях; *b* – фаски и закругления острых кромок деталей;  
*v* – сопряжения напыляемых поверхностей; *z* – цилиндрические детали [1, 3]

Сопряжения поверхностей деталей должны иметь фаски  $45^\circ$  (рис. 1.3, б) или закругления радиусом 0,75 мм. В противном случае, при резком окончании покрытия, будут развиваться трещины. Это же относится к сопряжениям напыляемых поверхностей деталей, которые должны иметь фаски или скругления (рис. 1.3, в). На каждом конце цилиндрических деталей плеча следует оставлять заплечики [5], как показано на рис. 1.3, г, резкие окончания покрытия на конце цилиндрической детали (рис. 1.1, б) могут привести к образованию трещин.

Механическая обработка используется также для создания канавок или резб на поверхностях деталей перед напылением (рис. 1.4, а) для ограничения усадочных напряжений и нарушения пластинчатой (слоистой) структуры осаждения частиц с целью прерывания касательных напряжений, параллельных поверхности (рис. 1.4, б) [3]. Этот способ в основном применяется для напыления толстых покрытий или на поверхностях деталей с малым радиусом. Поверхностям, как правило, придается шероховатость после нарезания канавок двух типов: V-образных закругленных с углом  $70^\circ$  относительно поверхности и U-образных шириной 1,1–1,4 мм.

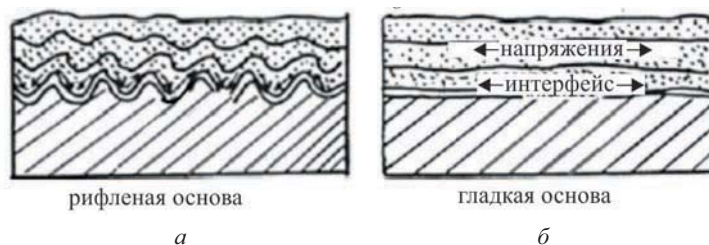


Рис. 1.4. Рифленая (а) и гладкая (б) поверхности под напыление [3]

## 1.2. Очистка и подготовка поверхности под напыление

Это первый шаг для подготовки поверхности. Перед напылением все загрязняющие вещества, такие как окалина, масло, жиры и краски, должны быть удалены. После удаления всех загрязнений детали, во избежание последующего загрязнения взвешенными в воздухе частицами и отпечатками пальцев, должны транспортироваться и устанавливаться с использованием чистых приспособлений и материалов.

В табл. 1.1 приведено краткое описание основных методов [4], используемых для подготовки деталей к напылению.

Специальная механическая обработка (нарезание «рваной» резьбы, фрезерование канавок, насечка поверхности и пр.) производится при нанесении покрытий значительной толщины или при тяжелых условиях эксплуатации деталей, особенно при действии срезающих нагрузок (табл. 1.2). После механической обработки проводится операция повторного обезжиривания для удаления загрязнений.

Таблица 1.1. Методы подготовки деталей к напылению

Метод обработки	Характеристика
Обезжиривание паром	Быстрый, эффективный и экономичный способ удаления органических загрязнений [4]. Для удаления масла из трещин и поверхности пор длительность выпаривания составляет 15–30 мин. Пористые материалы подвергаются более длительной обработке. Из-за экологических проблем необходима рециркуляция растворителя. Для снижения агрессивности и высыхания без образования пленки также используются алифатические углеводороды в смеси с другими растворителями. Изопропиловый спирт применяется для тонкой очистки, но они не эффективны для тяжелых масел и некоторых других загрязнений. Крупные детали обрабатываются парами или погружаются в растворитель, например, водные мощные растворы, содержащие уксусную кислоту
Выжигание в печах	Пористые детали, например, отливки, полученные в песчаных формах, которые могут поглощать большое количество масла, обжигаются при 315 °С в течение 4 ч, чтобы высушить масло и предотвратить его выпотевание
Ультразвуковая очистка	Используется, когда загрязняющие вещества находятся в недоступных зонах деталей [4]. Растворитель должен быть адаптирован к процессу и требованиям безопасности. Оборудование представляет собой содержащий моющий раствор накопительный бак, в который детали погружаются и подвергаются интенсивной обработке ультразвуком с помощью серии ультразвуковых преобразователей, распределенных вокруг наружных стенок резервуара
Струйно-абразивная обработка	Мокрая струйно-абразивная обработка – обдувка потоком разбавленной суспензии абразивных сред, направляемым воздушной струей, или обдувка струей воды, содержащей абразивные частицы. Типичные суспензии содержат абразив в соотношении 600 кг/м <sup>3</sup> с добавлением антикоррозийных присадок. Размер абразива должен быть адаптирован к выполняемой работе, а обработанные детали – тщательно промыты после очистки. Сухая струйно-абразивная обработка используется для удаления припеченных отложений, окалин и оксидов. Поток сжатого воздуха, содержащий абразивные частицы, направляется через сопло на обрабатываемую поверхность детали [5]
Очистка щетками	Используется при необходимости локальной очистки. Применяются небольшие портативные вращающиеся проволочные щетки с электроприводом [3]
Обдувка сухим льдом	Метод струйной обработки с использованием гранул сухого льда, которым придано ускорение струей сжатого воздуха. Гранулы состоят из твердого углекислого газа при температуре около –79 °С, типичные размеры – в диапазоне нескольких миллиметров (обычно диаметр 3 мм при длине 5–15 мм). Гранулы сухого льда относительно мягкие (твердость 2–3 по Моосу), что приводит к незначительному повреждению (низкая абразивность) поверхности и граничных зон. Способ не вызывает коррозии. Уникальной особенностью сухого льда в качестве материала для обдувки является то, что он испаряется при контакте с очищаемой поверхностью. Под действием энергии удара ледяных гранул загрязняющие вещества удаляются, как и при пескоструйной обработке. Кроме того, они также создают микротермические удары в контактных зонах между поверхностью детали и загрязнителями, вызывающие растрескивание и расслаивание последних. Кроме того, гранула сухого льда взрывается при ударе и быстро нагревается, газ CO <sub>2</sub> частично расширяется под поверхностью загрязняющего вещества, тем самым участвуя в его удалении.

	<p>Струйная обработка сухим льдом неабразивна, и поверхности подвергаются мягкой обработке. Способ может использоваться на легко повреждаемых поверхностях деталей из никеля, хрома и алюминия. Струйная обработка сухим льдом рекомендуется для удаления загрязнений, таких как клеи, лаки, масла, смазки и угольная пыль [6, 7].</p> <p>Для струйной обработки сухим льдом характерны:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– очистка криогенным и механическим воздействием;</li> <li>– охлаждение детали и покрытия при напылении;</li> <li>– гибкость;</li> <li>– экологичность</li> </ul>
Кислотное травление	<p>Эффективный метод очистки. Деталь полностью погружается в раствор кислоты на время, зависящее от ее материала и желаемого съема припуска.</p> <p>За счет различной скорости травления кристаллов и межкристаллитных включений обрабатываемого материала на обработанной поверхности формируется комплекс микронеровностей.</p> <p>После травления, промывки горячей водой и щелочным раствором необходима тщательная очистка горячей водой или обдувка паром</p>
Вибрационная обработка	<p>В качестве рабочей среды используются: сухой наполнитель (бой абразива или другие твердые материалы); сухой наполнитель с химически активным и мощным раствором (в том числе при непрерывной циркуляции раствора); химически активный раствор (виброхимическая обработка).</p> <p>Поверхность деталей, подвергнутых виброобработке, очищается от различных загрязнений, оксидов и приобретает повышенную активность, что позволяет наносить на поверхность изделий тонкие покрытия из металлов и других материалов, обладающих специальными свойствами (антикоррозионными, антифрикционными и др.)</p>
Виброхимическая обработка	<p>Обработка обеспечивает селективный съем металла с точностью до 1 мкм. Применяется для подготовки деталей, имеющих сложную поверхность с закрытыми полостями, позволяет снимать заусенцы и облой, шлифовать и полировать, удалять окалину и продукты коррозии</p>
Электронскровая обработка	<p>Применяется в случаях, когда основа имеет высокую твердость и не может быть обработана дробеструйным или механическим способом. В качестве электродов используются пучки никелевой (стальная основа) или алюминиевой (алюминиевая основа) проволоки. Электроды расплавляются электрической дугой, небольшие частицы металла припариваются к поверхности основы, образуя выступы размером 0,10–0,75 мм.</p> <p>Метод позволяет за счет огрубления поверхности в значительной степени повысить прочность сцепления покрытий с основой. Однако его нельзя применять при нанесении тонких покрытий. Недостатками метода являются низкая производительность (0,19–0,37 м<sup>2</sup>/ч) и снижение усталостной прочности деталей.</p> <p>Поверхности после электронскровой обработки рекомендуется подвергать струйно-абразивной обработке</p>
Предварительный нагрев детали	<p>В некоторых случаях непосредственно перед нанесением покрытий для снижения возникающих остаточных внутренних напряжений в покрытии, удаления адсорбированной влаги и повышения прочности сцепления покрытий рекомендуется предварительный нагрев детали до температуры 150–200 °С. Детали в нагретом виде устанавливаются в приспособление для напыления.</p> <p>Подогрев детали является обязательным в случае вынужденного перерыва в операции напыления перед ее возобновлением</p>

Метод обработки	Характеристика
Активация основы	Может осуществляться дуговым разрядом между соплом плазматрона и деталью при разрежении в рабочей камере. Давление в рабочей камере – на уровне 50 кПа. При силе тока дуги 800 А в камере возникает длинная, быстро расходящаяся, сверхзвуковая, плазменная струя, которая покрывает значительную площадь детали и нагревает ее до требуемой температуры
Ионная очистка	При плазменном нанесении покрытий возможно осуществление предварительной ионной очистки основы в плазме газового разряда. Давление в вакуумной камере – 1,33 Па. После очистки производят напыление покрытий. Недостаток метода – неполное удаление внедрившихся в очищаемую поверхность твердых частиц

Таблица 1.2. Методы специальной обработки деталей под напыление

Специальная обработка	Характеристика
Нарезание рваной резьбы	<p><i>Механическая обработка со снятием стружки</i></p> <p>Используется при нанесении покрытий толщиной 0,5 мм и более, обеспечивает высокую прочность сцепления при сдвиге покрытия с поверхностью детали.</p> <p>При нарезании рваной резьбы используется резьбовой резец с углом при вершине <math>55^\circ-60^\circ</math>. Вершина угла должна иметь радиус закругления 0,3–0,5 мм. Угол резания – <math>80^\circ</math>. Передний угол резца – равен нулю или отрицателен (<math>2^\circ-5^\circ</math>). Резец устанавливается в резцедержателе с вылетом 100–150 мм. Режущая кромка резца смещается ниже оси детали.</p> <p>При нарезании нельзя применять охлаждающие жидкости.</p> <p>Рваная резьба нарезается за один проход. На небольшие детали (диаметром 80 мм) наносится мелкая треугольная резьба глубиной 0,6 мм с шагом 0,8 мм. При обработке изделий большего диаметра – резьба с большими шагом и глубиной. Например, при диаметре 250 мм шаг должен составлять 2,0 мм, глубина – 1,5 мм.</p> <p>После нарезания необходимо контролировать профиль рваной резьбы (рис. 1.5). Заусенцы, появляющиеся на вершинах неровностей, удаляются шабером или широким резцом при вращении детали.</p>

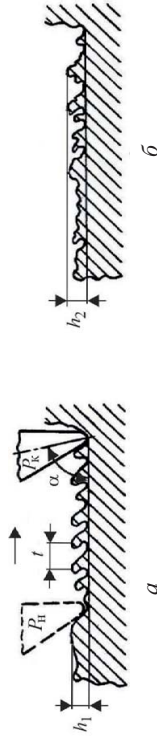
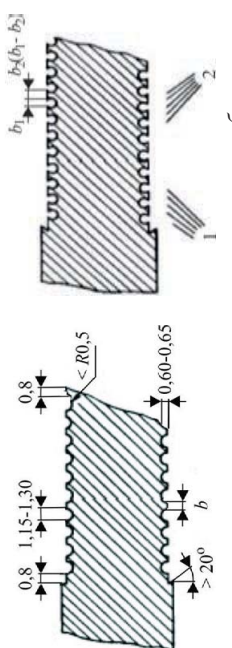


Рис. 1.5. Удовлетворительный (а) и неудовлетворительный (б) профили рваной резьбы:  $P_{нр}$ ,  $P_{к}$  – положение резца в начале и конце обработки соответственно;  $\alpha$  – угол наклона оси резца (в плане) относительно оси детали (должен быть равен  $70^\circ-75^\circ$ );  $t$  – шаг резьбы;  $h_1$  и  $h_2$  – глубина резьбы (0,5–0,8 мм);  $\rightarrow$  – направление движения резца

Иглофрезерование	<p>Обработка выполняется иглофрезами, дающими возможность удалять с обрабатываемой поверхности за один проход слой металла толщиной 0,002–3,000 мм. Иглофрезерование может заменить струйно-абразивную, химическую и другие виды обработки.</p> <p>Процесс технологичен, высокопроизводителен, экономичен</p>
Фрезерование насечки	<p>Нанесение насечки фрезой применяется для лучшего закрепления покрытия толщиной более 1,0 мм, напыленных на литые изделия. Насечка наносится ручным аппаратом в несколько рядов при наклонном положении фрезы. Канавки и риски расположены наклонно в различных направлениях по отношению к покрываемой поверхности. Насечка поверхности стальных или чугунных деталей может выполняться вручную с помощью пневматического зубила. Канавки клиновидной формы прорезаются дисковой фрезой или строгальным резцом</p>
Нарезание кольцевых канавок	<p>Кольцевые канавки нарезаются при подготовке к напылению конических поверхностей отрезным резцом с режущей кромкой шириной 1,2–1,4 мм, углы которого закруглены (радиус 0,3–0,5 мм). Ширина канавок – 1,2–1,4 мм при шаге 1,6–2,0 мм, глубина – 0,7–0,8 мм. На конических поверхностях со шпоночными канавками нарезаются рваные кольцевые канавки, а на гладких конических поверхностях – гладкие кольцевые канавки с последующей накаткой их вершин. Шероховатость рваных кольцевых канавок достигается установкой реза так, как и при нарезании рваной резьбы. Накатка вершин кольцевых канавок выполняется на токарном станке с помощью обычного приспособления с накатным роликом, закрепляемого в резцедержателе станка</p>
<i>Механическая обработка без снятия стружки</i>	
Косая сетчатая накатка поверхности	<p>Применяется при подготовке к напылению наружных гладких цилиндрических поверхностей незакаленных деталей из материала, твердость которого не превышает 35 HRC. Применение накатки с горизонтальной насечкой недопустимо, так как возникает опасность появления в напыленном металле трещин по выдавливаемым рифлениям вследствие внутренних напряжений.</p> <p>На накатывающихся роликах фрезеруются треугольные зубья с закругленными вершинами и впадинами, расположенными под углом 30° к оси ролика и направленными у одного ролика вправо, а у другого влево. Ролики изготавливаются из стали У10А (60–62 HRC). Окружная скорость детали при накатывании – 3–4 м/мин. Врезание роликов на полную глубину накатки осуществляется за 1–2 оборота детали без включения продольной подачи с минимальным числом оборотов шпинделя станка. В качестве смазочно-охлаждающих технологических средств используется машинное масло. Накатывание проводят за один проход с продольной подачей 0,5–1,0 мм/об</p>
Пластическое поверхностное деформирование	<p>Обкатка шариками, роликами, выглаживание, вибрационное накатывание позволяют при минимальных затратах повысить усталостную прочность, износостойкость, контактную выносливость деталей и увеличить ресурс работы машины. В результате такой обработки в поверхностных слоях возникает сжимающие напряжения.</p> <p>Для каждого конкретного случая обработки деталей подбирают наиболее приемлемый метод</p>
Специальная обработка	Характеристика

<i>Комбинированная механическая обработка</i>	
Нарезка полукруглой резьбы	<p>Перед напылением покрытй толщиной несколько миллиметров на обрабатываемой поверхности нарезается полукруглая резьба (рис. 1.6, а). После нарезки витки резьбы накапываются роликом для осуществления пластической деформации их наружных слоев (рис. 1.6, б).</p> 
	<p>Рис. 1.6. Подготовка к напылению цилиндрических деталей нарезанием полукруглой резьбы: а – профиль резьбы после нарезки; б – профиль резьбы после обкатки (1) и напыления (2) подслоя</p> <p><i>Обработка свободным абразивом</i></p>
Струйно-абразивная обработка	<p>В результате воздействия абразивных зерен на обрабатываемую поверхность образуется новый микрорельеф с пластически деформированным слоем. Глубина наклепанного слоя зависит от зернистости абразивного материала, угла атаки струи абразива и времени воздействия.</p> <p>Одним из основных факторов процесса является концентрация воздушно-абразивной смеси, т. е. отношение массы воздуха, проходящего через сопло в единицу времени, к массе абразива, выбрасываемого соплом за этот же период. Концентрация абразивной смеси зависит от зернистости и марки абразива, ее значение может изменяться в пределах <math>0,8-4,0 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}</math>.</p> <p>Угол атаки струи абразива (угол между осью струи абразива и плоскостью очистки) может изменяться в диапазоне <math>30^\circ-90^\circ</math>. Для очистки поверхности мягких материалов рекомендуются меньшие значения угла, а для более твердых – большие.</p> <p>Оптимальное расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности – <math>150-250 \text{ мм}</math>. Большие значения рекомендуются для мягких поверхностей, меньшие – для более твердых.</p> <p>Давление воздуха – <math>0,3-0,6 \text{ МПа}</math>.</p> <p>Обработка производится в специальных камерах. После струйно-абразивной обработки детали обдуваются сухим сжатым воздухом для удаления частиц абразива с поверхности.</p>

Требования к абразивным материалам по группам:

- 1) геометрические параметры и физико-механические свойства абразивных зерен из проволочки и отходов листового проката;
  - 2) стружка (медная, алюминиевая, латунная);
  - 3) искусственные – стеклянные шарики, карбид кремния (карборунд), оксид алюминия (электрокорунд), дробленый шлак;
  - 4) минеральные – дробленый гранит и др.;
  - 5) органические – дробленая скорлупа орехов, опилки твердых пород дерева, дробленые косточки абрикосов и вишен.
- Материалы третьей группы используются ограниченно. Материалы четвертой группы, имеющие твердость ниже, чем обрабатываемый материал, применяются, когда требуется обработка поверхности без изменения ее геометрических размеров.
- Размеры применяемых частиц металлической дробы – 0,09–1,40 мм, электрокорунда и карборунда – 0,003–2,000 мм. Абразивные зерна изометрической формы целесообразно использовать для струйной обработки поверхностей с высокой твердостью при больших ударных нагрузках. При меньших ударных нагрузках, когда обрабатываются поверхности с невысокой твердостью, применяются абразивные зерна других форм, в особенности с выраженной несимметричностью. При выборе абразивного материала необходимо учитывать состояние обрабатываемой поверхности и заданную чистоту очищаемой поверхности. Например, применять для грубых операций дробь чугунную колотую с зернистостью ниже 0,63–1,40 мм нецелесообразно.
- Обычно в качестве абразивных материалов используется электрокорунд зернистостью 80–150 или металлическая дробь (чугунная или стальная колотая) № 01, 02, 03, 05. Абразив из электрокорунда может быть использован до 30 раз, металлическая дробь – 60–90 раз. Электрокорунд после 5–7-кратного использования необходимо просушить при температуре 200–250 °С в течение 3,5 ч и отделить мелкую фракцию (менее 100 мкм).
- Участки поверхности деталей, не подлежащие напылению, должны быть защищены от воздействия струйно-абразивной обработки экранами или другими приспособлениями. Зона обработки должна быть на  $5 \pm 2$  мм больше зоны напыления. При толщине стенки детали 0,5 мм и менее необходимо применять специальные приспособления и соблюдать меры предосторожности, исключающие чрезмерный съем материала детали и ее коробление. После дробеструйной обработки деталь обдувают сжатым воздухом для удаления частиц абразива с поверхности. Допустимый разрыв во времени между подготовкой поверхности и напылением зависит от условий выполнения работы и не должен превышать: в закрытых помещениях – 6 ч (желательно проводить операцию напыления в течение первых 2 ч); на открытом воздухе в сухую погоду – 3 ч; под навесом в сырую погоду – 30 мин. Во избежание ослабления прочности сцепления покрытия с изделием недопустимо попадание на подготовленную поверхность влаги или образование на ней конденсата.



Специальная обработка	Характеристика
	<p>Рекомендуемые режимы струйно-абразивной обработки порошком электрокорунда на механизированных установках:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– давление сжатого воздуха – 0,4–0,6 МПа;</li> <li>– угол атаки струи – 60°–90°;</li> <li>– расстояние от среза сопла до поверхности изделия – 100–120 мм;</li> <li>– скорость вращения деталей: стальных при твердости &gt; 40 HRC – 6–8 м/мин, при &lt; 40 HRC – 8–10, алюминиевых – 10–12 м/мин;</li> <li>– подача – 4–6 мм/об;</li> <li>– расход абразива – 3–5 кг/ч;</li> <li>– число проходов – 2.</li> </ul> <p>Контроль качества струйной обработки ведется сравнением с эталонными образцами, которые необходимо хранить в чистой, сухой, плотно закрытой упаковке</p>

### 1.3. Специальная обработка для придания требуемого профиля и шероховатости поверхности

*Сухая абразивная* пескоструйная обработка является наиболее часто используемым способом получения требуемой шероховатости поверхности под напыление.

Поверхности после струйно-абразивной обработки имеют хорошо развитый микрорельеф, характеризуемый достаточно большими высотными параметрами, средними значениями шаговых параметров, малыми радиусами впадин и выступов и достаточно большими углами наклона боковой стороны профиля. Все это обеспечивает надежное сцепление напыленного слоя с основой.

При ударе абразивных частиц по обрабатываемой поверхности имеют место два основных типа воздействий [8]. Первый создается ударом острого углового участка частицы, при котором образует углубление, часто с валиком на периферии. Образующийся кратер имеет угловую форму, крутые грани и копирует форму ударяющей частицы абразива. Кратеры образуются также пластическим вдавливанием в поверхностный слой и упругим сжатием непосредственно прилегающих зон материала. Этот эффект называется деформацией вдавливанием. Второй тип воздействия – когда ударяющаяся частица сталкивается с поверхностью и вырезает микрократер участком с большим углом или заостренной передней частью на его выходном участке. Острый край частицы врезается в металл, создавая свежую поверхность, деформируя металл и завальцовывая его на ненарушенной поверхности. Кратер более закруглен, чем в первом случае, но все еще имеет угловатую форму, особенно в области формирования микростружек. Имеет место деформация, связанная с процессом резания, которая включает в себя как разрушение, так и упруго-пластическую деформацию.

Величины деформации и неровностей, формируемых на поверхности, являются функциями диаметра, массы, твердости воздействующих частиц, скорости и угла, под которым они соударяются с основой. Конечно, деформация основы и величина неровностей также зависят от материала основы (твердости, модуль Юнга и пр.). Хрупкое разрушение и микрорезание материала ответственны за величину неровностей на обработанной поверхности.

Важно помнить, что импульс частицы  $m_p v_p$  зависит от ее массы, которая пропорциональна кубу среднего диаметра. Таким образом, раздробленные частицы, если их использовать повторно, будут иметь значительно меньший импульс, хотя при той же скорости воздушного потока скорость частицы увеличивается при уменьшении ее размера.

Наиболее часто используемые абразивы: оксид алюминия, карбид кремния и стальная остроугольная дробь.

Основные параметры струйно-абразивной обработки: размер и состав абразивных частиц, скорость их удара, причем последняя связана с внутренним диаметром сопла, типом струйной машины, скоростью воздушного пото-

ка (функция давления воздуха и внутреннего диаметра сопла), а также с размером абразивных частиц; угол удара; дистанция обработки; модуль Юнга материала детали.

Процедура очистки поверхности изделия после струйно-абразивной обработки для более полного удаления остатков абразива состоит в продувке сжатым воздухом под давлением 0,4–0,5 МПа с помощью сопла с внутренним диаметром 4 мм в течение нескольких десятков секунд и последующем погружении детали в ванну с ацетоновым раствором или ультразвуковым перемешиванием.

Струйно-абразивная обработка вызывает формирование напряжений сжатия в металлических основах вследствие пластической деформации поверхностного слоя толщиной около 0,1–0,2 мм [2]. Это показано на рис. 1.7 для чугунной основы. При размере частиц глинозема 1,4 мм максимальные остаточные напряжения сжатия могут достигать 1600–2000 МПа. Это напряжение, конечно, изменяет распределение напряжений между покрытием и подложкой. При напылении материалов с высоким теплосодержанием сжимающие напряжения могут быть частично сняты при нагреве пластически деформированного слоя основы до температуры восстановления. Эта релаксация только частичная, потому что время напыления обычно меньше времени, необходимого для полной релаксации. Для снятия напряжений сжатия основы после струйно-абразивной обработки и перед напылением детали должны быть нагреты в печи с контролируемой атмосферой, чтобы избежать окисления, например, согласно рекомендациям работы [9].

Увеличение высоты микронеровностей поверхности основы до некоторого предела приводит к росту прочности сцепления, дальнейшее повышение шероховатости заметного влияния на этот параметр не оказывает (рис. 1.7).

Коэффициент использования материала растет с увеличением шероховатости экстремально (рис. 1.8).

Для лучшей механической составляющей адгезии пиковая высота, характеризующая параметром  $R_t$ , должна быть адаптирована к среднему размеру сплэтов, как показано на рис. 1.9.

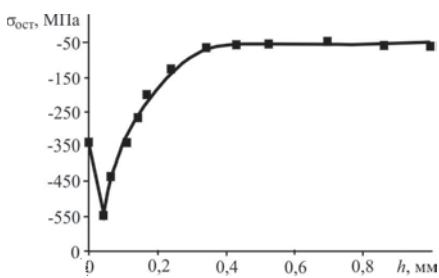


Рис. 1.7. Распределение остаточных напряжений, измеряемое методом сверления, в основах литого чугуна FT25 после струйно-абразивной обработки (пистолет всасывающего типа,  $p = 0,3$  МПа, диаметр: сопла – 8 мм, глинозема – в среднем 0,5 мм) [2]

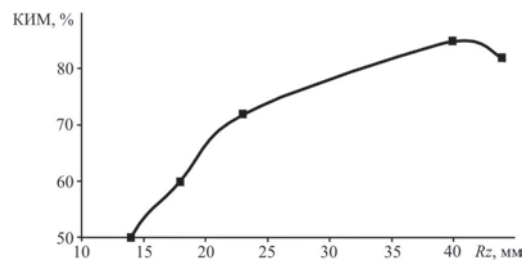


Рис. 1.8. Влияние шероховатости поверхности основы на коэффициент использования металла. Толщина слоя – 0,15 мм; дистанция напыления – 150 мм

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>Глава 1. Подготовка поверхностей деталей под напыление</b> .....	8
1.1. Предварительная механическая обработка .....	9
1.2. Очистка и подготовка поверхности под напыление .....	15
1.3. Специальная обработка для придания требуемого профиля и шероховатости поверхности .....	23
<b>Глава 2. Общие представления о процессе напыления</b> .....	33
2.1. Формирование газотермических покрытий .....	33
2.2. Нагрев частиц в потоке газа при напылении покрытий .....	40
2.3. Теплообмен частицы с окружающей средой при газотермическом напылении ..	54
2.4. Структурные уровни газотермических покрытий .....	65
2.5. Моделирование процессов газотермического напыления покрытий .....	73
2.6. Системный подход к моделированию взаимодействия напыляемых частиц с основой .....	84
2.7. Виды взаимодействия частиц с основой .....	91
2.8. Формирование показателей качества газотермических покрытий .....	100
<b>Глава 3. Методы исследования напыления частиц</b> .....	109
3.1. Осаждение отдельных частиц .....	109
3.2. Форма, морфология и температура напыляемых частиц .....	112
3.3. Устройства для изучения удара и расплющивания частиц .....	117
3.4. Методы исследования удара и адгезионной прочности напыленных частиц ..	125
<b>Глава 4. Взаимодействие в системе частица–основа</b> .....	132
4.1. Контактное давление при ударе расплавленных частиц .....	132
4.2. Термическое взаимодействие расплавленных частиц с основой .....	144
4.2.1. Модели распространения тепла .....	144
4.2.2. Температура контакта .....	154
4.2.3. Влияние скорости соударения на термический цикл в контакте между частицей и основой .....	158
4.2.4. Термическое контактное сопротивление между частицей и основой .....	165
4.3. Исследование напыленных частиц .....	169
4.4. Растекание расплавленных частиц .....	179
4.4.1. Модель растекания капли расплава на гладкой поверхности .....	180
4.4.2. Влияние поверхностных явлений на растекание капель расплава .....	189
4.4.3. Виды образования сплэтов – напыленных частиц .....	195
4.5. Затвердевание напыляемых частиц .....	198
<b>Глава 5. Формирование сплэтов на поверхности детали</b> .....	209
5.1. Влияние параметров соударения на форму напыленных частиц .....	209
5.1.1. Модели расплющивания частиц расплава .....	209
	415

5.1.2. Влияние температуры основы и давления рабочей среды на формирование сплэтов. . . . .	224
5.1.3. Десорбция адсорбатов и конденсатов. . . . .	240
5.1.4. Образование сплэтов при подплавлении основы . . . . .	245
5.1.5. Динамика разбрызгивания капель . . . . .	258
5.2. Удар расплавленной частицы о шероховатую основу . . . . .	265
5.2.1. Влияние шероховатости на формирование сплэтов. . . . .	265
5.2.2. Выбор оптимального микрорельефа поверхности основы . . . . .	278
5.3. Косой удар частицы расплава о поверхность основы. . . . .	291
5.4. Особенности взаимодействия частиц с основой . . . . .	302
5.5. Численное моделирование удара капли . . . . .	306
<b>Глава 6. Лезвийная обработка деталей с покрытиями. . . . .</b>	<b>314</b>
6.1. Особенности строения композита покрытие–основа . . . . .	314
6.2. Предпосылки для разработки технологий механической обработки покрытий. . . . .	323
6.3. Температура резания при обработке напыленных покрытий . . . . .	331
6.3.1. Точение покрытий с кристаллической структурой . . . . .	331
6.3.2. Точение покрытий с аморфно-кристаллической структурой. . . . .	336
6.4. Износ и стойкость инструмента при обработке напыленных покрытий. . . . .	342
6.4.1. Обрабатываемость покрытий с кристаллической структурой . . . . .	342
6.4.2. Обрабатываемость покрытий с аморфно-кристаллической структурой . . . . .	346
6.5. Практический опыт обработки деталей с газотермическими покрытиями . . . . .	358
6.5.1. Обработка деталей нефтепромышленного оборудования. . . . .	358
6.5.2. Обработка автомобильных деталей с покрытиями . . . . .	361
<b>Глава 7. Алмазно-абразивная обработка деталей с покрытиями . . . . .</b>	<b>366</b>
7.1. Абразивный инструмент и условия шлифования покрытий . . . . .	366
7.2. Шлифование газотермических покрытий . . . . .	371
7.3. Ленточное шлифование и обработка эластичным инструментом . . . . .	380
7.4. Наследование свойств рабочих поверхностей при механической обработке напыленных деталей . . . . .	385
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>400</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>402</b>