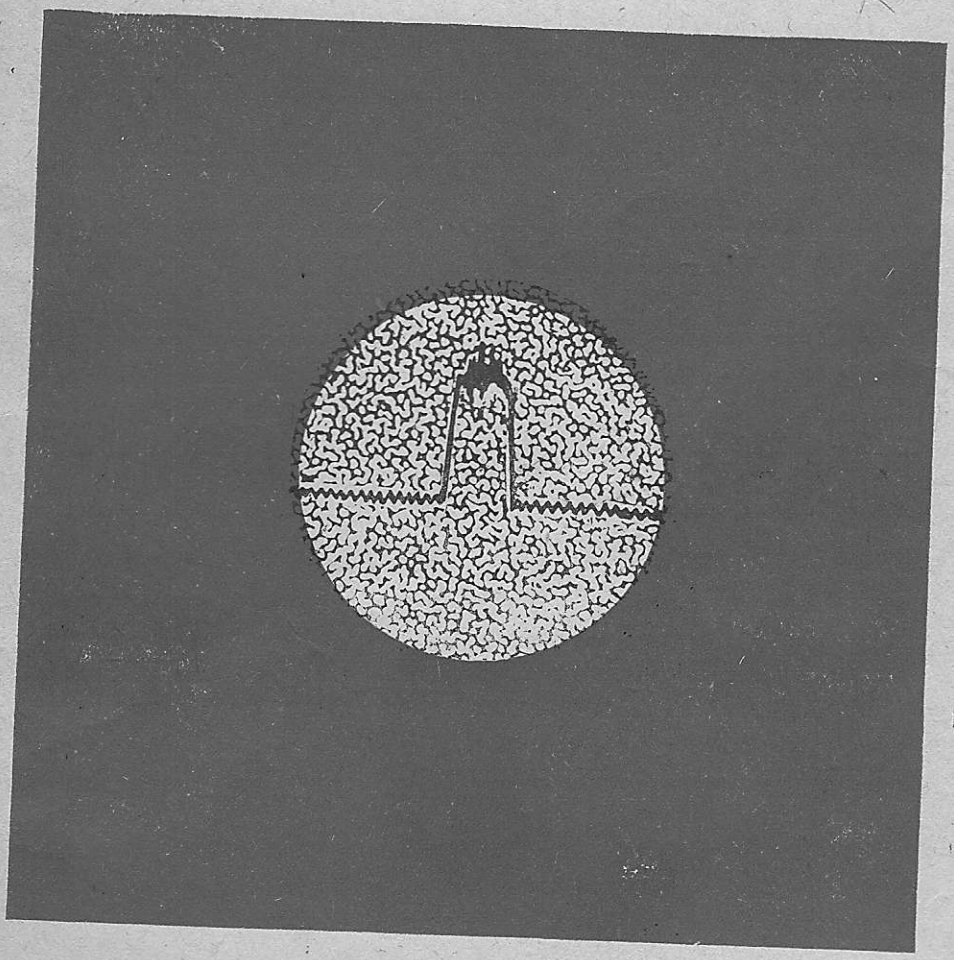
Г. И. Саютин

ВЫБОР ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ



Г. И. САЮТИН

ВЫБОР ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

(для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей)

Шорасов

Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1976

6П4.67
С22
УДК 621.922.025

Рецензент канд. техн. наук **В. А. Хрульков**

Саютин Г. И.
С22 Выбор шлифовальных кругов (для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей). М., «Машиностроение, 1976.

64 с с ил.

В книге описаны методы оценки основных критериев качествaа шлифованной поверхности. На основе комплексного изучения процесса шлифования даны рекомендации по выбору материала абразива, связки и структуры кругов, а также режимов шлифования для повышения качества шлифованной поверхности изделий из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов и инструментальных сталей.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников машиностроительных заводов и научно-исследовательских институтов.

С $\frac{31207\text{-}121}{038(01)\text{-}76}$ 121-76 **6П4.67**

© Издательство «Машиностроение», 1976 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Надежность изделий в значительной степени зависит от состояния поверхностного слоя, для улучшения качества которого используют различные методы абразивной обработки (шлифование, полирование, доводку, суперфиниширование и др.).

Физические и металлографические методы исследования и, в частности, электронно-микроскопические, рентгеноспектральные и рентгеноструктурные методы позволяют изучить многие явления, связанные с улучшением качества поверхности и ее влиянием на надежность изделий. Эти методы необходимо применять в первую очередь при выборе кругов для шлифования ответственных деталей из дорогих сложнолегированных сплавов, к которым относятся жаропрочные, теплостойкие титановые, нержавеющие и инструментальные сплавы.

От выбранной характеристики шлифовальных кругов и состояния их режущей поверхности в процессе шлифования зависит качество поверхности изделий, поэтому качество необходимо рассматривать в связи с явлением затупления кругов и режимами обработки. На основании изучения структуры, субмикроструктуры, химического состава, микротвердости и остаточных напряжений в тончайших поверхностных слоях можно улучшить характеристики кругов и выбрать оптимальные условия шлифования деталей из жаропрочных и инструментальных сплавов и сталей.

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАТУПЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ И РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ

Особенности процесса затупления кругов при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов

Затупление шлифовальных кругов, вызывая увеличение силы резания и температуры при шлифовании, а также вибрации в системе СПИД, приводит к увеличению шероховатости шлифованной поверхности и остаточных напряжений, а также структурным изменениям, которые при совместном влиянии могут резко ухудшить эксплуатационные свойства деталей. В связи с этим необходимо знать, как изменяются основные показатели процесса шлифования — производительность, сила резания, контактная температура и качество шлифованной поверхности в зависимости от состояния режущей поверхности шлифовальных кругов на разных стадиях затупления.

В связи с широким использованием адгезионно- и диффузионно-активных сплавов складываются новые представления о процессе затупления шлифовальных кругов, которые отличаются от существующих представлений о затуплении кругов при шлифовании стальных деталей. Если при шлифовании деталей из сталей затупление характеризуется образованием площадок на вершинах абразивных зерен, их самозатачиванием и заполнением пор кругов стружкой, то при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов режущая поверхность круга покрывается частицами металла, деформированного в направлении действия вектора силы P_z, т. е. поверхность режущих кромок зерен практически изолируется металлом (рис. 1).

При резании металл, налипший на зерно, контактирует со шлифуемой деталью и в процессе взаимного трения возникает схватывание, способствующее ухудшению качества поверхности. Особенностями процесса шлифования деталей из жаропрочных сплавов являются более высокие переменные нагрузки на абразивные зерна по сравнению со шлифованием деталей из конструкционных сталей. При царапании образцов из сплава ЖС6К сила микрорезания P_z сильно изменяется, а при микрорезании образцов из стали У8 остается постоянной. Резкое изменение силы P_z объ-

Рис. 1. Микрофотография поверхности затупленного круга. ×120

ясняется неоднородными свойствами фаз, содержащихся в жаропрочных сплавах; например, микротвердость упрочняющих фаз — интерметаллидов Ni_3 (Ti, Al) и комплексных хромисто-ванадиевых карбидов составляет HV 2030—2060 и примерно равна микротвердости электрокорунда (HV 1952—2168) [25]; основа сплава γ-твердого раствора значительно мягче упрочняющих фаз.

Прочностные характеристики жаропрочных сплавов при температуре 20°С почти не отличаются от прочностных характеристик сталей; их различие проявляется при высоких температурах. Пределы прочности при растяжении сплава ЖС6К и инструментальной стали Р18 приблизительно одинаковы и равны соответственно 900 МН/² (90 кгс/мм²) и 800 МН/м² (80 кгс/мм²). При температуре 900°С $\sigma_в$ сплава уменьшается до 800 МН/м² (80 кгс/мм²), а стали У8 — до 110 МН/м² (11 кгс/мм²).

Теплопроводность жаропрочных сплавов значительно ниже (приблизительно в 3 раза) теплопроводности сталей, поэтому теплота, выделяющаяся при шлифовании, значительно медленнее отводится в тело детали; она локализуется в поверхностных слоях. По данным В. А. Хрулькова, средняя контактная температура при шлифовании деталей из жаропрочного сплава ХН77ТЮР достигает 610°С и приблизительно в 1,5 раза выше, чем при шлифовании деталей из стали 45 [25]. При нагреве поверхностные слои деталей из жаропрочного сплава несколько разупрочняются. Однако, несмотря на это, удельная работа шлифования деталей из жаропрочного сплава ЖС6К при разных режимах в 1,3—2,7 раза больше, чем удельная работа шлифования деталей из стали У8 в отожженном состоянии (рис. 2).

Удельная работа шлифования

$$A = \frac{PL}{V},$$

где P — сила резания при шлифовании, H; L — путь, пройденный режущей кромкой круга за время ее касания со шлифуемым образцом, м; V — объем снятого металла, мм³.

Сила резания при шлифовании

$$P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2},$$

где P_y и P_z — нормальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании, измеренные с помощью динамометра, конструкция которого описана ниже.

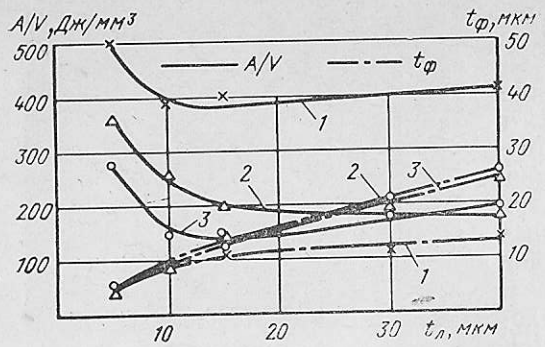


Рис. 2. Изменение удельной работы A/V и фактической глубины $t_ф$ шлифования деталей из стали У8 и сплава ЖС6К в зависимости от подачи по лимбу; круг 45А 12 С1 9К; $v_к = 28{,}7$ м/с; $s_{пр} = 30$ м/мин:

1 — сплав ЖС6К; *2* — сталь У8 (отожженная, *HRC* 5); *3* — сталь У8 закаленная (*HRC* 55)

Путь

$$L = v_к t,$$

где $v_к$ — скорость круга, м/с; t — время, в течение которого снимается слой металла заданной толщины, с.

При одинаковой подаче по лимбу фактическая глубина резания при шлифовании деталей из жаропрочного сплава в 1,3 раза меньше, чем при шлифовании деталей из стали У8.

Особенности процесса шлифования деталей из жаропрочных сплавов обусловливают низкую стойкость кругов, малую удельную производительность процесса и плохое качество шлифованных поверхностей; например, при шлифовании деталей из конструкционных и легированных сталей в лабораторных условиях удельная производительность изменяется в пределах 25—30; при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов различных марок удельная производительность в редких случаях равна 18 [25], чаще 1—3 [2]. На операциях круглого профильного шлифования пера турбинных лопаток из различных сплавов удельная производительность равна 0,33—1,2, а на операциях плоского шлифования елочного профиля замка лопаток — 0,52 [2]. Нормы удельной производительности при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов значительно ниже, чем при шлифовании деталей из сталей [27].

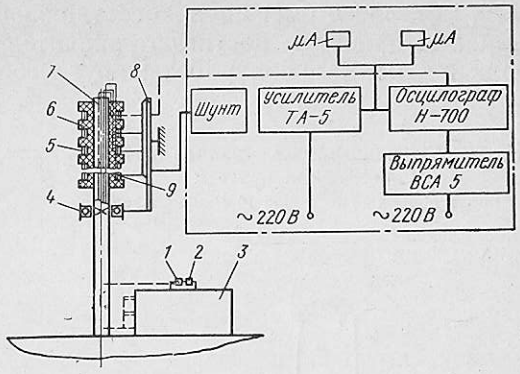
Силы резания в процессе затупления шлифовальных кругов

Силы резания при шлифовании измеряли на плоскошлифовальном станке 3740 с вращающимся столом с помощью устройства, схема которого представлена на рис. 3. Устройство имеет динамометрический стол [18], блок для измерения контактной температуры, смонтированный на динамометре, и электронно-усилительные и регистрирующие приборы. Датчики и термопары подключены к аппаратуре через токосъемник. Температуру в зоне шлифования измеряли с помощью полуискусственной микротермопары [22]. В процессе шлифования через каждую минуту измеряли фактический съем металла.

Измерение силы резания и съема металла в разных стадиях затупления кругов между правками показывает (рис. 4), что в начальный период шлифования после правки круга составляющие

Рис. 3. Схема устройства для измерения сил и температуры при шлифовании:

1 — образцы с термоэлектродом; *2* — образец для длительного шлифования; *3* — динамометрический стол; *4* — подшипник; *5* — контактные щетки; *6* — втулка эбонитовая; *7* — стойка (труба); *8* — кронштейн; *9* — кольца



силы увеличиваются особенно интенсивно, затем рост замедляется и, наконец, наступает период даже некоторого их снижения. Интенсивный рост сил в начальный период объясняется постоянным увеличением фактической глубины резания, которая возрастает в этот период, прежде всего потому, что уменьшается размерный износ круга в результате замедления процесса разрушения вершин наиболее слабых зерен после правки. Кроме того, при врезании устраняются зазоры в механизмах подачи станка, что приводит также к некоторому увеличению фактической глубины резания.

Росту сил в данный период способствует налипание металла (см. рис. 1) на абразивные зерна, наблюдаемое под микроскопом. Разрушение зерен влияет на рост сил, особенно в первый период шлифования, когда разрушаются слабо закрепленные зерна. Несколько позже влияние самозатачивания оказывается слабее налипания. В период, когда фактическая глубина шлифования приблизится к величине подачи, осуществляемой по лимбу станка, рост сил происходит в результате затупления и, главным образом, налипания металла на поверхность круга, как это показано на рис. 1. Измерение характера силы резания при затуплении круга представлено на рис. 5, *б*, а на рис. 5, *а* — после правки круга.

В результате действия составляющих P_y и P_z силы резания при затуплении круга вырываются целые зерна на отдельных участках режущей поверхности (рис. 6,*а* и *б*). Глубина вырывов равна приблизительно 0,2—0,5 мм. Из-за нарушения формы круга получается прерывистый контакт, что приводит к некоторому увеличению

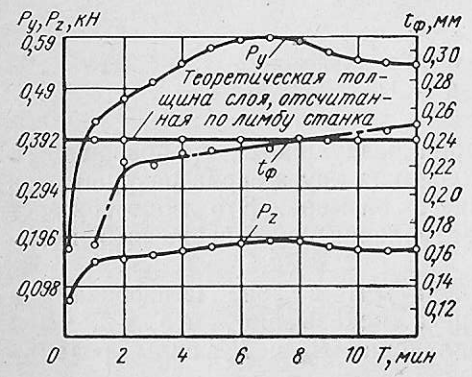


Рис. 4. Изменение составляющих P_y, P_z силы при шлифовании и глубины резания в зависимости от времени работы шлифовального круга 15А 12 С1 6К 51Б:

$v_м = 27{,}7$ м/с; скорость детали $v_д = 30$ м/мин; $t = 0{,}005$ мм

съема металла и уменьшению составляющих P_y и P_z силы резания. Вибрации при этом достигают значительных величин, и для продолжения нормальной работы круг необходимо править. Измене-

Рис. 5. Осциллограммы записи сил при шлифовании кругом:
а — после правки; *б* — после 10 мин шлифования

ние размеров зерен, собранных в процессе шлифования кругом после его правки и затупления, показано на рис. 7. В начальный период, когда самозатачивание является определяющим фактором

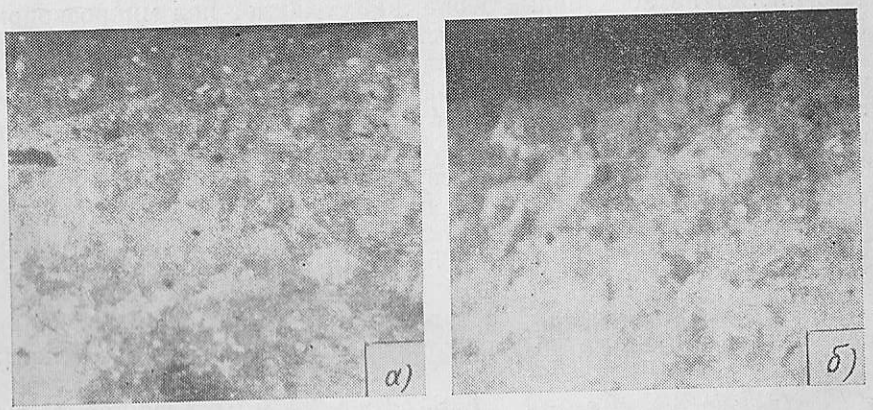
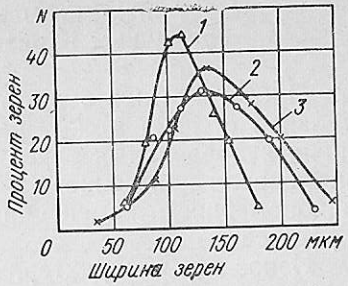


Рис. 6. Профиль режущей поверхности круга:
а — после правки; *б* — после 10 мин шлифования

по сравнению с налипанием, зерна разрушаются с образованием мелких осколков. В процессе затупления круга зерна разрушаются с образованием осколков большего размера. Это подтверждает положение о том, что в период затупления круга зерна вырываются, почти не самозатачиваясь.

Измерения контактной температуры в зоне шлифования в разные периоды затупления круга показывают, что в период интенсивного увеличения составляющих P_y и P_z силы резания

Рис. 7. Изменение размеров зерен:
1 — исходного состава; *2* — собранных после 2 мин шлифования; *3* — собранных после 10 мин шлифования



температура возрастает от 560 до 850°С. В период уменьшения составляющих P_y и P_z силы резания в результате действия вибраций и разрушения поверхности круга температура уменьшается от 850 до 750°С. Таким образом, в разные периоды затупления круга при шлифовании деталей из сплава ЖС6К температура в зоне шлифования увеличивается в 1,3—1,5 раза. Эти данные незначительно отличаются от результатов исследований С. С. Силина [20]. С. С. Силин не наблюдал понижения температуры при затуплении круга, по-видимому, потому, что при шлифовании деталей из стали 38ХГСНА затупление кругов протекает иначе.

Динамику шлифования трудно оценить составляющими P_y и P_z силы резания, съемом металла, износом круга и т. д. Составляющие P_y и P_z силы резания для обобщенной оценки процесса шлифования представим в общем виде как отношение P_y/P_z, которое характеризует долю энергетических затрат на разрушение материалов (по данным Н. И. Богомолова).

В процессе затупления шлифовальных кругов различных характеристик отношение P_y/P_z изменяется по закономерности

$$\frac{P_y}{P_z} = AT^B e^{cT},$$

где T — время шлифования; A, B, c — коэффициенты.

В начальный период затупления кругов отношение P_y/P_z увеличивается до определенного значения, а затем уменьшается (рис. 8). Увеличение отношения P_y/P_z обусловлено тем, что при затуплении кругов составляющая P_y силы резания растет более интенсивно, чем P_z. Когда в процессе налипания металла возникают вибрации, эффективность разрушения металла увеличивается (отношение P_y/P_z уменьшается), однако в этот период круг необходимо править. В зависимости от характеристики шлифовального круга отношение P_y/P_z может изменяться в пределах 1,85—4,1. Показатель P_y/P_z может служить критерием, который характеризует влияние различных кругов на динамику процесса шлифования.

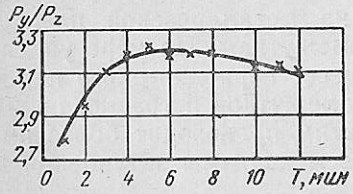


Рис. 8. Изменение отношения P_y/P_z в процессе затупления шлифовального круга 15А 12 С1 6К: $v_к$=28,7 м/с; $v_д$=30 м/мин; t=0,005 мм

Механизм затупления и разрушения единичных абразивных зерен при микрорезании

Представления о затуплении шлифовальных кругов в значительной степени можно расширить при изучении затупления единичных абразивных зерен в процессе микрорезания. Автор книги исследовал поведение налипшего металла, от которого зависят закономерности изменения сил шлифования и других показателей процесса.

Износ зерен характеризуется одновременно двумя процессами: разрушением кромок и образованием площадок износа с налипшим металлом. В результате разрушения поверхности зерен происходит образование микронеровностей. Направление рисок микронеровностей часто не совпадает с направлением вектора скорости микрорезания, что является результатом анизотропии свойств кристаллов абразива. Анизотропия свойств кристаллов взаимосвязана с анизотропией износа; например, износ в плоскости, параллельной главной кристаллографической оси, меньше по сравнению с износом в плоскости, перпендикулярной этой оси, для карбида кремния в 20 раз, а для корунда в 2 раза [3]. В результате деформации кристаллов при трении на поверхности зерен образуется субмикрорельеф, который влияет на силу трения [3]. При царапании деталей из жаропрочных сплавов образование субмикрорельефа будет способствовать налипанию металла на поверхность зерен, особенно в тех зонах зерна, которые подвергаются деформации под действием незначительных нагрузок (например, передняя поверхность зерна при малых глубинах микрорезания). Схватывание зерна с металлом происходит при первых же касаниях. Металлическая пленка появляется сначала на вершинах микронеровностей зерна (рис. 9, *а*), затем металл проникает на дно канавок, и поверхность зерна покрывается металлом (рис. 9, *б*). На поверхности налипшего металла видны риски, направление которых совпадает с направлением вектора скорости резания.

В процессе микрорезания налипший металл периодически отрывается вместе с мелкими частицами зерна, а затем налипает снова. При разрушении зерна на его поверхности образуются микровыступы, в промежутках между которыми видна поверхность зерна (рис. 9, *в*). Можно предположить, что отрыв частиц зерна, а также образование микровыступов и промежутков между ними являются результатом схватывания металла, налипшего на зерно, со шлифуемой деталью. В некоторых случаях при налипании металла зерно мгновенно разрушается с образованием осколков. Разрушению предшествуют трещины на металлической пленке, которые проходят, как правило, по промежуткам. По мере увеличения времени затупления зерен в процессе периодического налипания и отрыва металла количество промежутков и трещин на их поверхности увеличивается; в связи с этим происходит более интенсивное разрушение зерен. Описанные механизмы затупления и

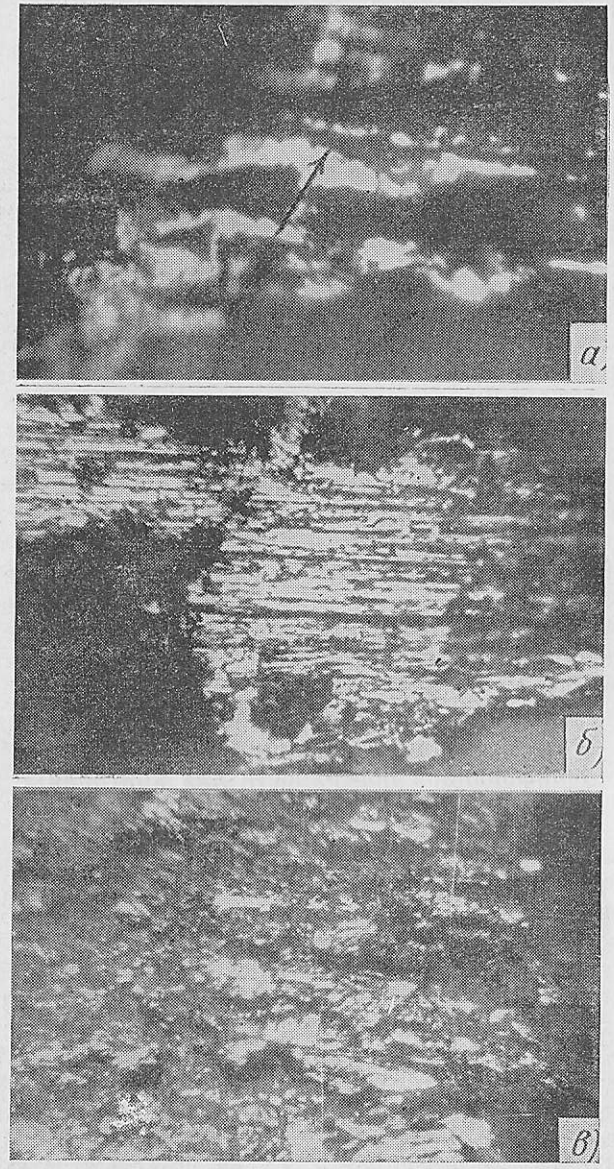


Рис. 9. Поверхность зерна, ×1080:
а — в начальный период схватывания с металлом; *б* — в период интенсивного налипания металла; *в* — после срыва налипшего металла

разрушения единичных зерен подтверждают закономерности изменения сил резания при обработке деталей из жаропрочных сплавов на всех стадиях затупления шлифовальных кругов. В начальный период микрорезания на профиле рисок содержится меньше микронеровностей (рис. 10, *а*), чем при микрорезании

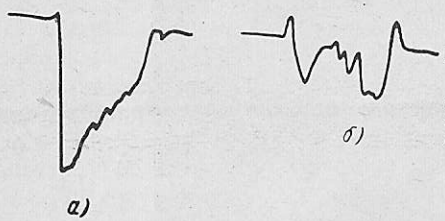


Рис. 10. Профиль риски на поверхности детали при микрорезании:

а — острым зерном; *б* — после разрушения задней поверхности зерна и налипания металла на передней поверхности; горизонтальное увеличение, ×200; вертикальное, ×4000

зерном после разрушения его задней поверхности и налипании металла на передней поверхности (рис. 10, *б*). Эти данные подтверждают влияние затупления единичных зерен на рельеф поверхности при единичных актах микрорезания. Объем металла, вытесненный из зоны риски при царапании затупленным зерном, несколько больше, чем при царапании острым зерном, что свидетельствует о более интенсивной деформации металла при царапании затупленным зерном.

При выборе кругов оптимальными можно считать такие, которые в наименьшей степени склонны к адгезионному взаимодействию с обрабатываемым металлом и обеспечивают в разные периоды затупления минимальные стабильные значения сил при максимальном съеме металла.

Разработка и выбор критериев качества шлифованной поверхности для контроля эксплуатационных свойств кругов

Детали из жаропрочных сплавов работают, как правило, в условиях вибрационных нагрузок и высоких температур, поэтому основной характеристикой, определяющей работоспособность деталей, является предел выносливости.

Предел выносливости зависит от физико-механических свойств поверхностных слоев металла, являющихся местом зарождения усталостных трещин и коррозионных процессов. Сохранение исходных свойств материалов в процессе изготовления деталей или получение упрочненных поверхностных слоев может служить резервом улучшения эксплуатационных показателей машин. Предел выносливости при изгибе с симметричным циклом $\sigma_{-1}=34{,}5-0{,}1\sigma_{ост}$. Предел выносливости равен 157—430 МН/м² (16—44 кгс/мм²) в зависимости от различных условий шлифования. Наклеп отрицательно влияет на предел выносливости деталей, работающих при температуре выше 700°С [17].

Главными критериями качества поверхности являются остаточные напряжения, величина и глубина распространения которых взаимосвязаны с пределом выносливости. Наиболее благоприятной эпюрой остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей представляется эпюра, в которой напряжения — сжимающего характера. Величина и глубина распространения как растягивающих, так и сжимающих напряжений должны быть регламентированы с учетом получения максимальной долговечности. Высокий уровень сжимающих напряжений может отрицательно влиять на прочностные свойства деталей и их долговечность.

Эффективность выбора характеристик кругов и технологического процесса обработки деталей из труднообрабатываемых сплавов не может быть правильно определена без комплексной оценки качества шлифованной поверхности по всем критериям. Современные требования к качеству и надежности машин основываются на представлениях о состоянии тончайших поверхностных слоев изготовляемых деталей. Необходимо учитывать комплекс критериев качества поверхности: шероховатость и субмикрорельеф; структуру, субмикроструктуру и химический состав тончайших поверхностных слоев; микротвердость; остаточные напряжения.

Геометрические характеристики поверхности включают понятия о ее макро-, микро- и субмикрогеометрии. Особой разновидностью макрогеометрии является волнистость, которая связана с неравномерностью процесса шлифования вследствие изменения геометрической формы круга, жесткости системы СПИД, трения поверхности круга о деталь. Образование волнистости изучено значительно слабее, чем такие характеристики геометрической формы, как конусообразность, некруглость, бочкообразность и седлообразность деталей. Микрогеометрия характеризуется шероховатостью поверхности, оценка которой производится согласно ГОСТ 2789—73.

Приборы для оценки шероховатости с ощупывающей иглой позволяют по профилограммам оценить высоту микронеровностей, но дают ограниченную информацию о качественном состоянии поверхности. Этот недостаток можно восполнить путем дополнительных исследований поверхности на оптических микроскопах МИМ-7, МИМ-8М. Применять совместные методы контроля необходимо при оценке качества шлифованных поверхностей деталей из труднообрабатываемых сплавов, при обработке которых проявляется адгезионное воздействие — надиры, следы схватывания, участки налипшего металла (рис. 11). Эти явления нельзя наглядно показать при одном профилографировании, между тем они могут влиять на долговечность изделий. Наиболее полную информацию о шероховатости шлифованной поверхности можно получить с помощью прибора МИИ-4. Для этого изучают (рис. 12, *а*) вид поверхности при увеличении в 460 раз (при необходимости получения увеличения в 1000 раз применяют микроскопы МИМ-7 или МИМ-8М). Затем с помощью прибора МИИ-4 измеряют микрошероховатость с применением интерференции в обычном (рис. 12, *б*) и монохроматическом (рис. 12, *в*) свете. При одина-

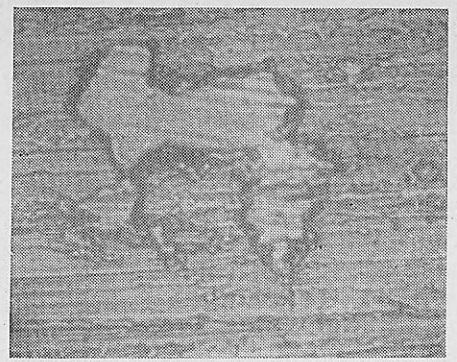


Рис. 11. Шлифованная поверхность детали из сплава ЖС6К, ×880; круг 34А 12 СМ2 6К 51Б; t=0,005 мм/об стола; $v_к$=28,7 м/с; $v_д$=15 м/мин

ковой шероховатости поверхности деталей из титанового сплава после шлифования со скоростью 3 м/с на поверхности видны четкие следы микрорезания, вследствие чего интерференционные картины на всех исследуемых участках характеризуют протекание равномерной деформации (рис. 12,*а—в*). При увеличении скорости до 36 м/с наряду с участками, подвергнутыми равномерным микрорезанию и деформации, встречаются участки, где характер деформации качественно иной (рис. 12,*г*). Об этом свидетельствуют интерференционные фотографии, на которых геометрическое изменение величины микрошероховатостей периодически нарушается (рис. 12,*д* и *е*). С увеличением скорости круга, а следовательно, с повышением теплового воздействия на поверхности образуются надиры, кратеры и т. п., являющиеся

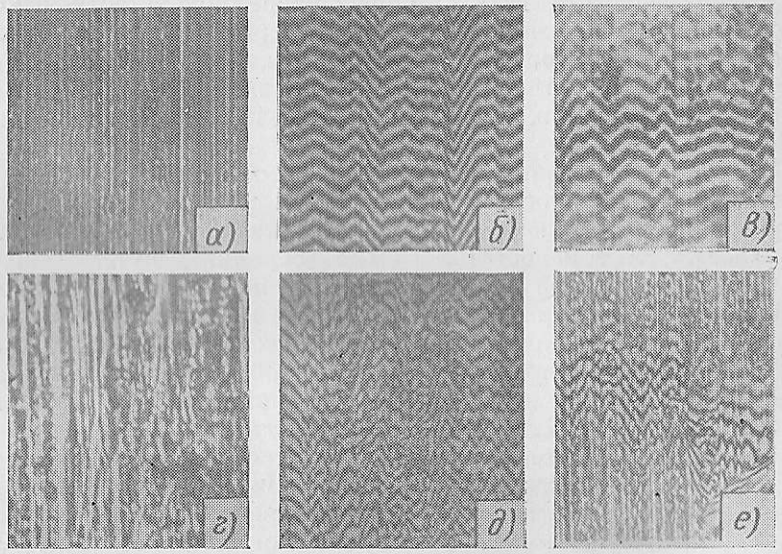


Рис. 12. Шлифованная поверхность детали из титанового сплава ВТ3-1, ×580 (*а, г*) и интерферрограммы (*б, в, д, е*):

а, в, г, е — в обычном свете; *б, д,* — в монохроматическом свете; круг 63С 25 МЗК; $s_{поп}$=0,5 мм/ход стола; *а, б, в* — $v_к$=3 м/с; $s_{пр}$=1,5 м/мин; *г, д, е* — $v_к$=36 м/с; $s_{пр}$=18 м/мин

следствием сложного физико-химического взаимодействия абразивов с титановым сплавом. Поэтому количественной характеристики микронеровностей — шероховатости поверхности при выборе кругов—оказывается недостаточно.

Разрешающая способность приборов, предназначенных для оценки микрорельефа, не позволяет сформулировать представления о более тонких изменения в геометрии шлифовальных поверхностей — субмикрогеометрии на участках площадью от одного до нескольких квадратных микрометров. Изучение субмикрогеометрии — субмикроскопического рельефа — дает информацию о явлениях, протекающих в зоне единичных шлифовочных рисок при микрорезании металла субмикронеровностями абразивных зерен различных видов. Современный уровень развития электронной оптики и электронно-микроскопических исследований способствует изучению субмикрорельефа. С помощью электронного микроскопа удается обнаружить влияние изменений технологии шлифования и доводки на формирование поверхности [21].

В процессе разработки методики электронно-микроскопических исследований субмикрорельефа шлифованных поверхностей труднообрабатываемых жаропрочных и теплостойких сплавов нами были установлены преимущества одноступенчатых углеродных реплик по сравнению с лаковыми. Эти реплики получались при распылении угольных стержней на вакуумной установке ЭВП-2. Оптимальный контраст реплики получался при ее оттенении электролитическим хромом под углом 40°.

Внешний вид шлифованной поверхности детали из жаропрочного сплава под микроскопом МИМ-7 представлен на рис. 11. На поверхности видны полосы деформированного металла и включения, которые образуются в результате отрыва частиц металла, налипшего на зерна, и его схватывания с металлом шлифуемым. В процессе переноса получается поворот налипшего металла на некоторый угол относительно направления основной деформации. Размеры включений изменяются в пределах 0,005—0,06 мм и находятся в прямой зависимости от глубины шлифования.

Шероховатость поверхности после шлифования в различных условиях изменяется незначительно; например, при увеличении глубины шлифования от 0,005 до 0,03 мм величина микронеровностей увеличивается в пределах одного класса. Закономерность изменения величины микронеровностей в зависимости от глубины шлифования представлена на рис. 13. Эту зависимость можно выразить в виде уравнения $Ra=1{,}3t^{0{,}6}$.

Подобные закономерности изменения шероховатости поверхности получены и другими исследователями при шлифовании деталей из сталей. Замедление возрастания шероховатости при непрерывном увеличении глубины шлифования объясняется небольшим увеличением толщины слоя металла, снимаемого одним зерном, при увеличении глубины шлифования (согласно расчетам Е. Н. Маслова); нагревом, размягчением и размазыванием по-

верхностного слоя металла (при уменьшении теплопроводности шлифуемых материалов действие этого эффекта усиливается, а стружкообразование уменьшается).

Разделить влияние первого и второго факторов при шлифовании деталей из сталей и сплавов трудно, однако изучение суммарного действия этих факторов показывает, что при шлифовании деталей из стали У10 с увеличением глубины резания от 5 до 30 мкм высота микронеровностей поверхности увеличивается в 1,6—2 раза, в то время как при шлифовании деталей из сплава ЖС6К высота микронеровностей увеличивается в 1,26 раза (рис. 13).

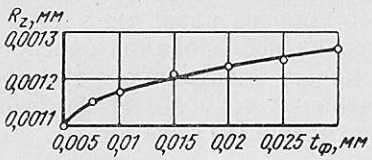


Рис. 13. Зависимость шероховатости поверхности от глубины шлифования; круг 45А 12 С1 6К 51б; режимы шлифования: $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=30 м/мин

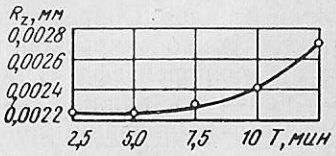


Рис. 14. Влияние затупления шлифовальных кругов на шероховатость поверхности; круг 34А 12 СМ2 6К 51б; $v_к$=27,8 м/с; t=0,005 мм/об стола; $v_д$=15 м/мин

При затуплении шлифовальных кругов в течение 12,5 мин шлифования величина микронеровностей на поверхности изменяется в пределах одного класса шероховатости (рис. 14). Более существенные изменения за это время протерпевает субмикрорельеф шлифованной поверхности.

При исследовании поверхности с помощью электронного микроскопа установлено, что при шлифовании кругом после его правки и после затупления субмикрорельеф рисок различен. В случае шлифования кругом после правки направление деформации металла на поверхности совпадает с вектором скорости (рис. 15, *а*). На шлифованной поверхности заметны следы деформации — наплывы металла на субмикронеровностях, являющиеся результатом микрорезания острыми микронеровностями незатупившегося зерна. При затуплении круга на поверхности детали появляется волнистость, направление которой почти перпендикулярно вектору скорости (рис. 15, *б*). В направлении вектора скорости на шлифованной поверхности периодически встречаются вырывы (рис. 15, *в*) в результате схватывания металла, налипшего на зерно, со шлифуемым металлом. Шлифованная поверхность похожа на поверхности, получающиеся после схватывания II рода в процессе износа трущихся пар. Одновременно с этим встречаются участки поверхности с выглаженным субмикрорельефом, по-видимому, в результате затупления режущих кромок зерен. Поперечные полосы на поверхности металла, полученные при шлифовании

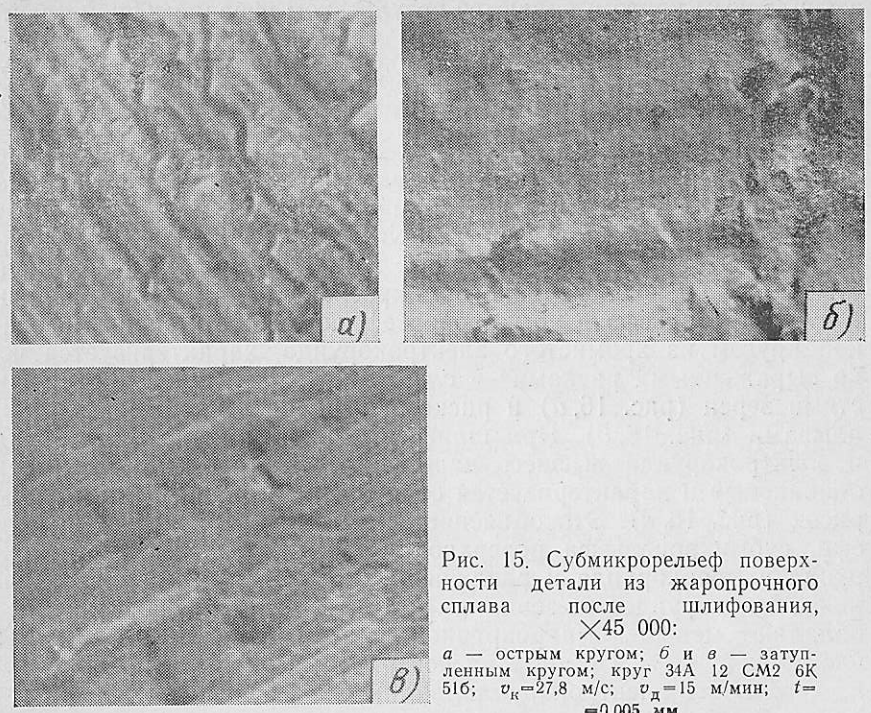


Рис. 15. Субмикрорельеф поверхности детали из жаропрочного сплава после шлифования, ×45 000:

а — острым кругом; *б* и *в* — затупленным кругом; круг 34А 12 СМ2 6К 51б; $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=15 м/мин; t=0,005 мм

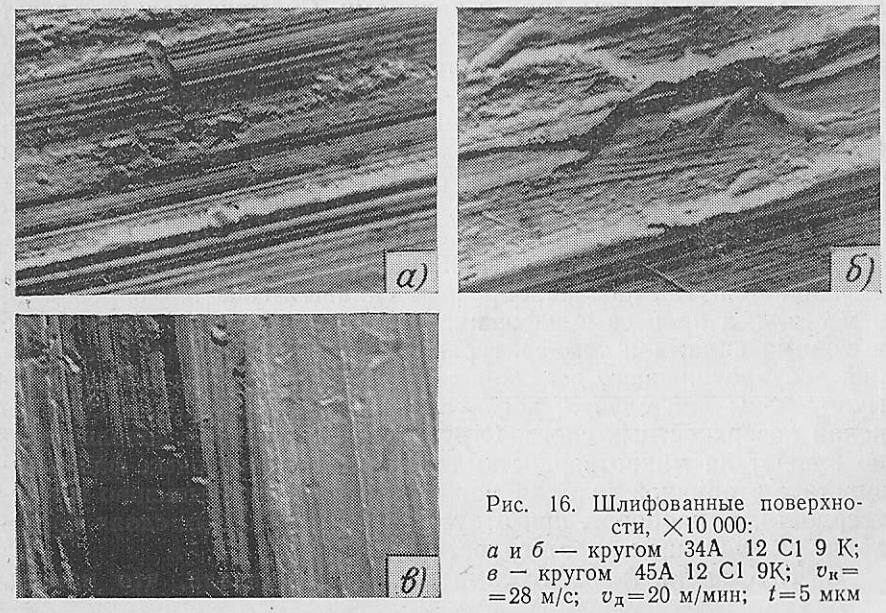


Рис. 16. Шлифованные поверхности, ×10 000:

а и *б* — кругом 34А 12 С1 9 К; *в* — кругом 45А 12 С1 9К; $v_к$=28 м/с; $v_д$=20 м/мин; t=5 мкм

затупленным кругом, являются результатом неравномерной пластической деформации, протекающей в процессе затупления круга. Поперечные полосы (рис. 15, *б*) служат концентраторами напряжений, и можно предполагать, что они отрицательно влияют на ресурс работы деталей.

Субмикрорельеф является более чувствительным критерием оценки явлений, лежащих в основе процесса шлифования, чем шероховатость поверхности. Так, при одинаковой шероховатости поверхности после шлифования кругами из хромистого электрокорунда, монокорунда и нормального электрокорунда высшего качества с помощью электронного микроскопа обнаружены различия в субмикрорельефе. Субмикрорельеф поверхности, прошлифованной кругом из хромистого электрокорунда, характеризуется четко выраженными рисками — следами резания, субмикронеровностями зерен (рис. 16, *а*) и рисками неопределенной формы с наплывами (рис. 16, *б*). При шлифовании кругами из монокорунда и электрокорунда высшего качества субмикрорельеф примерно одинаковый и характеризуется сравнительно плавными контурами рисок (рис. 16, *в*). Это объясняется различной развитостью рельефа, субмикрорельефа поверхности зерен хромистого электрокорунда и монокорунда и различным характером их самозатачивания. Монокорундовые зерна имеют более гладкие поверхности и обладают меньшей микрохрупкостью по сравнению с хромистым электрокорундом. Поэтому на поверхности, шлифованной кругами из хромистого электрокорунда, видны следы активного микрорезания субмикрорезцами, образовавшимися при разрушении зерен. Из-за большей развитости поверхности зерен интенсифицируется их адгезионное взаимодействие с металлами, которое характеризуется следами схватывания и надирами. Субмикрорельеф влияет на эксплуатационные свойства шлифованных поверхностей; он может явиться микроконцентратором напряжений и влиять на взаимодействие поверхностей деталей с газовой и жидкой средой.

При шлифовании под действием теплоты и пластической деформации микротвердость поверхностных слоев может изменяться существенно. В результате пластической деформации происходит упрочнение поверхностных слоев. Под действием теплоты кристаллическая решетка восстанавливается, металл «отдыхает» и вследствие этого степень упрочнения поверхностных слоев металла уменьшается. Так как жаропрочные сплавы менее теплопроводны, чем стали, а процесс шлифования сплавов характеризуется более высокими силами и температурами, то следует ожидать увеличения разупрочняющего действия теплоты. Эти представления сформулированы для случая, когда не происходит структурных изменений поверхностных слоев. Структурные изменения дополнительно влияют на микротвердость; так, образование новых фаз в результате вторичной закалки может привести к повышению микротвердости, и, наоборот, при отпуске в поверхностных слоях происходит уменьшение микротвердости.

С. Т. Кишкин, А. М. Сулима и другие показали, что наклеп,

созданный обычными методами обработки (точением, полированием), снижает предел выносливости деталей из сплава ХН77ТЮР как в холодном, так и в горячем состоянии. М. С. Рахмарова, Я. Г. Мирер [17] рекомендуют применять такие технологические процессы обработки, при которых не было бы наклепа, так как иначе предел выносливости уменьшается вследствие возрастания диффузионной подвижности атомов, с чем связаны такие явления, как чрезмерное старение сплава с сильным охрупчиванием поверхностного слоя, ускорение окисления и рекристаллизации.

Влияние наклепа при этом может компенсироваться действием сжимающих напряжений, сопутствующих наклепу. Однако в условиях эксплуатации деталей при температурах свыше 700°С действие сжимающих напряжений с увеличением наработки будет ослабевать вследствие их релаксации, а влияние наклепа возрастать. Поэтому нельзя рекомендовать обработку сплавов методами, вызывающими наклеп поверхности деталей, из сплавов, работающих при температурах свыше 700°С.

Для снятия наклепа и остаточных напряжений от предшествующих операций обработки необходимо, чтобы величина межоперационного припуска, снимаемого на данной операции, была равна или больше глубины наклепа и распространения остаточных напряжений, возникающих после предшествующей операции, а припуск снимался бы равномерно. Применительно к низкотемпературным условиям эксплуатации деталей наклеп положительно влияет на их долговечность, поэтому в этих случаях необходимо использовать упрочняющие методы обработки.

Для выявления степени влияния теплоты и пластической деформации на микротвердость жаропрочных сплавов при шлифовании изучено изменение микротвердости поверхностей. Исследования проведены на образцах, шлифованных при скоростях 30 и 1 м/с, при глубинах шлифования 5, 10, 15, 20, 30 мкм, и на образцах после шлифования кругом в разных стадиях затупления. Шлифование со скоростью 1 м/с, осуществлялось с помощью специального приспособления при давлении 0,3 МН/м² (~3 кгс/см²). Для того чтобы исключить налипание металла и уменьшить действие теплоты, образцы шлифовали в среде керосина.

Микротвердость в тончайших поверхностных слоях измеряли, используя косые срезы, с помощью которых можно измерять слои толщиной 0,001 мм и менее при расстоянии между отпечатками 0,01—0,015 мм. Срезы изготовляют с помощью приспособления, разработанного автором, схема которого представлена на рис. 17. В ползуне профрезерован паз под углом 3°, в который устанавливают и закрепляют струбцину с исследуемым образцом. При установке приспособления на диск со шлифовальной шкуркой пружина прижимает ползун со шлифом в шкурке, а корпус базирует микрошлиф в горизонтальной плоскости, гарантируя отсутствие завалов. Припуск металла снимается при движении приспособления вручную по шлифовальной шкурке. Вначале поверхность

шлифа выравнивают на шкурке из карбида кремния зернистостью М40, затем доводят на шкурке зернистостью М7.

Микротвердость измеряют с помощью прибора ПМТ-3 (рис. 18) при разных нагрузках. Каждый отпечаток измеряют по

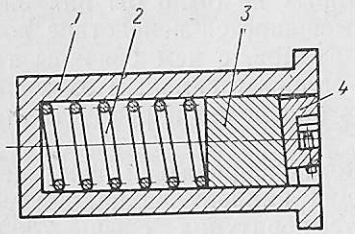


Рис. 17. Приспособление для подготовки косых срезов:
1 — корпус; 2 — пружина; 3 — ползун; 4 — струбцина

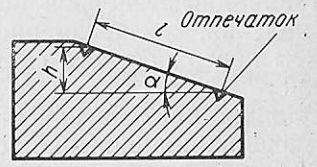


Рис. 18. Схема измерения микротвердости и расчета толщины исследуемых слоев на косом срезе

диагонали 3 раза. Среднее значение из полученных показаний принимают за микротвердость исследуемого слоя. Толщина исследуемых слоев определяется как катет прямоугольного треугольника $h = l \sin \alpha$, где h — толщина исследуемых слоев; l — расстояние между отпечатками.

Микротвердость иногда измеряют, используя прямые микрошлифы, подготовленные в плоскости, перпендикулярной шлифованной поверхности, однако в этом случае невозможно нанести отпечатки на минимальном расстоянии от края. Изменение микротвердости в поверхостных слоях при разных скоростях шлифо-

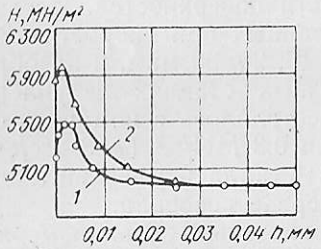


Рис. 19. Изменение микротвердости в поверхностных слоях жаропрочного сплава после шлифования; круг 34А 12 СМ2 6К 51б:
1 — $v_к = 27{,}8$ м/с; $v_д = 15$ м/мин; $t = 0{,}015$ мм; 2 — $v = 1$ м/с; $p = 0{,}3$ МН/м²

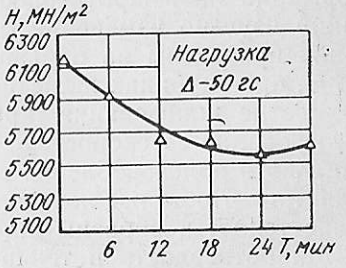


Рис. 20. Влияние затупления шлифовального круга на микротвердость поверхностных слоев; круг 45А 12 С1 6К 51б; $v_к = 27{,}8$ м/с; $v_д = 30$ м/мин; $t = 0{,}005$ мм

вания показано на рис. 19. Наблюдаются три зоны распределения микротвердости: заниженной микротвердости на шлифованной поверхности и интенсивного ее возрастания на глубине 1,5—2 мкм;

интенсивного понижения микротвердости, которая распространяется на глубину 10—15 мкм; плавного понижения микротвердости на глубине 25—35 мкм.

Упрочнение поверхностных слоев сплава оценивалось с помощью трех критериев: максимальной величины микротвердости, максимальной и общей глубины упрочненного слоя. Многие исследователи в качестве критерия используют степень упрочнения

$$H = \frac{H_ш - H_{исх}}{H_{исх}} 100\%,$$

где $H_ш$ — максимальное значение микротвердости поверхностных слоев после шлифования; $H_{исх}$ — исходная микротвердость.

Оценивая с помощью этих критериев микротвердость поверхностных слоев, можно отметить, что при шлифовании на больших скоростях степень упрочнения приблизительно в 2 раза меньше, чем при шлифовании на малых скоростях. Разное уменьшение микротвердости следует отнести за счет разупрочняющего действия теплоты. Разупрочняющее действие теплоты подтверждается в исследованиях влияния глубины шлифования на микротвердость поверхностных слоев. При шлифовании кругами характеристик 15А 12 СМ1 6К и 34А 12 СМ1 6К с увеличением глубины резания от 0,05 до 0,015 мм степень упрочнения поверхностных слоев несколько уменьшается.

В процессе затупления шлифовальных кругов упрочнение поверхностных слоев металла также несколько уменьшается вследствие повышения температуры и усиления разупрочняющего действия (рис. 20). Степень упрочнения деталей из сплава ЖС6К, шлифованных в различных условиях, изменяется в пределах 110—120%. Сравнивая эти данные с результатами исследований А. А. Маталина, полученными при шлифовании деталей из стали У10, после различной термической обработки (табл. 1), можно заме-

Таблица 1

Микротвердость сталей и сплавов после шлифования

Сталь	Термическая обработка	$H_ш/H_{исх}$ при t, мм	
		0,015	0,005
У10	Отжиг	2,2—2,4	1,8—2,1
	Нормализация	1,5—1,9	1,1—1,3
	Закалка:		
	на сорбит	1,35—1,45	1,2—1,4
	на троостит	1,2—1,3	1—1,2
	без отпуска	1	1
ЖС6К	—	1,1—1,15	1,2—1,25

Примечание. $H_ш$ — микротвердость шлифованных поверхностных слоев; $H_{исх}$ — микротвердость сердцевины.

тить, что степень упрочнения сплава незначительно отличается от степени упрочнения стали У10. Метод дисперсионного упрочнения жаропрочных сплавов приближает их к закаленной стали по склонности упрочняться при шлифовании.

При действии сил и теплоты в процессе шлифования деталей из жаропрочного сплава нет прямой связи между упрочнением и напряжениями, действующими в процессе деформации. При ужесточении условий шлифования (при возрастании глубины шлифования от 5 до 15 мкм) составляющие силы резания увеличиваются: P_y на 65%, P_z на 38%, а степень упрочнения уменьшается при этом на 5%. При затуплении круга составляющие P_y и P_z силы резания увеличиваются в 2 раза и более, а степень упрочнения уменьшается на 20%.

При шлифовании возникают деформации: а) поверхностных слоев вследствие трения абразивных зерен и связки круга о шлифуемый материал; б) вызываемые неоднородным тепловым расширением или сжатием при быстром и неравномерном нагреве или охлаждении детали; в) вызываемые неоднородным объемным изменением в результате фазовых превращений при отпуске поверхностных слоев.

Исследованиями А. В. Подзея доказано, что в образовании напряжений при шлифовании при отсутствии структурных изменений главную роль играет неоднородное тепловое расширение объемов металла. Поэтому регулирование процессов возникновения остаточных напряжений в основном сводится к регулированию термического процесса обработки деталей. Влияние теплового фактора на формирование растягивающих остаточных напряжений выявляется при шлифовании деталей из нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов, сопротивление деформации которых выше, а теплопроводность значительно ниже, чем у углеродистых сталей.

Успехи в области изучения влияния технологических факторов на остаточные напряжения I рода и наклеп неразрывно связаны с совершенствованием методов их исследования. Метод акад. Н. Н. Давиденкова, заключающийся в определении напряжений по значению модуля упругости исследуемого материала и деформации образца при последовательном удалении напряженных поверхностных слоев, непрерывно совершенствовался. Созданы и находят широкое применение приборы различных моделей [17], особенностью которых является непрерывное удаление напряженных слоев электролитическим способом при одновременной записи деформаций. М. Л. Перцовский применил метод «гибкого катода» для определения напряжений в хромовых покрытиях. Этот метод усовершенствован и применен для измерения остаточных напряжений в шлифовальных образцах из труднообрабатываемых сплавов. Ванночку *3* из органического стекла (рис. 21) наполняют электролитом и включают в электросхему, в которой анодом является испытуемый образец *1*, катодом — свинцовая пластина *2*. При электрополировании напряженных слоев в образце под влия-

нием релаксирующих напряжений возникают деформации, которые измеряются с помощью горизонтального микроскопа МГ-1 и окуляр-микрометра с точностью 0,005 мм (рис. 22). В зависимости от знака напряжений образец отклоняется вправо или влево. Из-

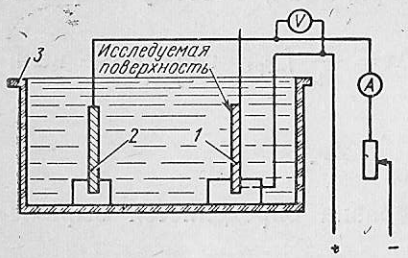


Рис. 21. Схема для электрополирования образцов:
1 — образец; *2* — катод; *3* — ванна

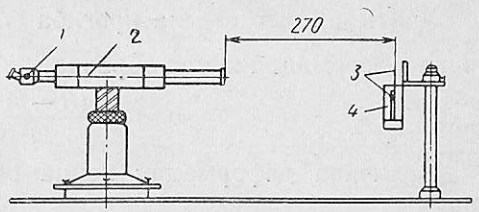


Рис. 22. Схема установки для измерения деформаций образца в процессе электрополирования:
1 — окуляр-микрометр; *2* — микроскоп МГ-1; *3* — образец со стрелкой; *4* — ванна

мерения производят непрерывно в процессе электрополирования по стрелке, приклеенной к концу образца и являющейся его непосредственным продолжением. Масса стрелки составляет 0,05 г. Образец закрепляют в специальном приспособлении с помощью винта. Нижний участок образца включают в электрическую цепь с помощью пружинящего уплотненного контакта и дополнительно тщательно изолируют цепон-лаком.

Важным условием является выбор оптимального состава электролита и режима электрополирования (плотности тока, напряжения и температуры). В процессе электрополирования напряженных слоев периодически регистрируют отклонение стрелки. Процесс удаления напряженных слоев с образца считается законченным в том случае, если показания стрелки остаются без изменений. После этого электрополирование прекращают. Образец снимают, промывают и просушивают. Толщину снятого слоя определяют с точностью 0,001 мм по уменьшению массы. Для определения скорости электрополирования и толщины стравленного слоя периодически измеряют массу стравленного слоя и его линейную толщину на оптиметре.

Зная деформации образца и толщину стравленных слоев, можно рассчитать остаточные напряжения и глубину их распространения. Величину напряжений в тонком измененном слое измеряют по формуле Н. Н. Давиденкова и Е. М. Шевандина, упрощенной К. С. Колевым [6]:

$$\sigma = \frac{4E\,(H-h)^2\,\Delta z}{3l^2\,\Delta h} - \frac{4E}{l^2}\,(H-2h+\Delta h)\,\Delta z,$$

где E — модуль упругости; H — толщина образца; Δz — стрела прогиба образца при снятии слоя толщиной h; h — суммарная толщина стравленного слоя; l — длина образца.

Первая часть формулы учитывает напряжения, вызванные уменьшением осевой силы; вторая часть формулы учитывает напряжения, вызванные изгибающим моментом. Согласно расчетам О. И. Кучерявого [8] величина второй части формулы мала и составляет 0,2—5% суммарного напряжения, поэтому в расчет принималась только первая часть.

Учитывая, что стрела прогиба $\Delta z = \frac{1}{4} f_{обр}$, где $f_{обр}$ — величина деформации конца образца,

$$\sigma = \frac{E(H-h)^2 \Delta f_{обр}}{3l^2 \Delta h}.$$

Величина деформации конца образца определяется выражением

$$\frac{f_{стр}}{f_{обр}} = \frac{l_{обр} + l_{стр}}{l_{обр}},$$

где $f_{стр}$ — отклонение стрелки, измеренное с помощью микроскопа МГ-1; $l_{обр} + l_{стр}$ — общая длина образца и стрелки.

Описанные прибор и метод оценки остаточных напряжений просты, надежны и доступны широкому кругу специалистов. Можно применять также метод измерения деформации интерференционным методом. Сущность этого метода заключается в том, что на противоположной стороне от шлифованной поверхности подготовляют микрошлиф и с помощью микроскопа снимают исходную интерференционную картину. Затем в процессе удаления напряженных слоев регистрируют изменение этой картины. По этим изменениям можно определить деформации и остаточные напряжения.

Распределение остаточных напряжений в поверхностных слоях, сформированных в условиях шлифования на больших и малых скоростях, приведено на рис. 23. Сжимающие напряжения могут возникать в поверхностных слоях деталей из сплава ЖС6К при очень низких скоростях обработки, когда действие теплоты уменьшено. При шлифовании со скоростью 1 м/с глубина распространения напряжений приблизительно в 3 раза меньше, чем при шлифовании со скоростью 30 м/с, т. е. зона действия пластической деформации при малых скоростях шлифования значительно меньше зоны действия мощного теплового поля при больших скоростях. Можно предположить, что при ужесточении режимов шлифования, а следовательно, при увеличении сил резания и количества выделяющейся теплоты происходит пропорциональное увеличение максимальных остаточных напряжений в поверхностных слоях шлифуемых деталей.

Изменение максимальных остаточных напряжений и общей глубины их распространения в зависимости от наиболее важной составляющей режима — фактической глубины шлифования — представлено на рис. 24. При увеличении глубины шлифования от 0,005 до 0,02 мм максимальные напряжения увеличиваются от

590 МН/м² (60 кгс/мм²) до 1350 МН/м² (120 кгс/мм²), а общая глубина распространения напряжений от 150 до 220 мкм. При увеличении глубины шлифования свыше 0,02 мм величина напряжений уменьшается, а общая глубина распространения остаточных напряжений хотя и увеличивается, но менее интенсивно, чем при глубине шлифования 0,005—0,02 мм.

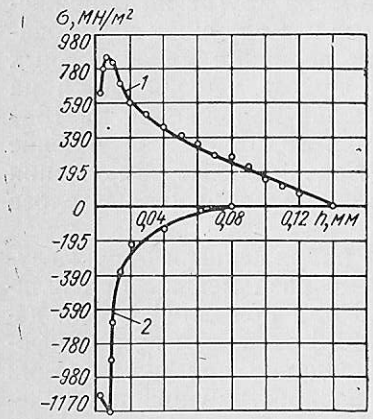


Рис. 23. Изменение остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей из жаропрочного сплава после шлифования кругом 34А 12 С1 6К: 1 — $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=30 м/мин; t=0,005 мм; 2 — v=1 м/с; p=0,3 МН/м²

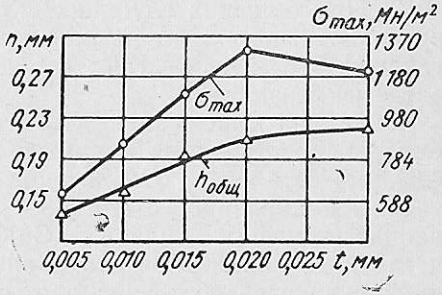


Рис. 24. Влияние глубины шлифования на величину максимальных остаточных напряжений и толщину напряженных слоев; круг 45А 12 С1 6К 51б; $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=30 м/мин

Существуют предельные значения остаточных напряжений, характеризующиеся тем, что при увеличении сил и температур дальнейшего возрастания напряжений не наблюдается. Можно предположить, что напряжения, величиной больше 1275 МН/м² (130 кг/мм²), являющиеся в данном случае предельными, вызывают невидимые микро- и субмикротрещины. Возникновению трещин предшествуют сдвиги по границам зерен или внутри них. Протекание этих процессов обусловливает релаксацию, которая и снижает остаточные напряжения. При шлифовании деталей из сплавов ХН70МТЮ и ХН77ТЮР максимальные остаточные напряжения изменяются в пределах 500—600 МН/м² (50—60 кгс/мм²), т. е. меньше, чем при шлифовании деталей из сплава ЖС6К, а глубина распространения напряжений изменяется в пределах 35—230 мкм, т. е. так же, как для деталей из сплава ЖС6К.

При затуплении шлифовальных кругов исследуемых характеристик величина максимальных остаточных напряжений и общая глубина распространения напряжений, как правило, увеличиваются; так, при глубине шлифования 0,005 мм в процессе затупления кругов характеристик 15А 12 СМ1 6К и 34А 12 СМ1 6К напряжения увеличиваются от 600—800 МН/м² (60—80 кгс/мм²) до 700—900 МН/м² (70—90 кгс/мм²). Глубина распространения напряжений при этом возрастает от 130—150 до 155—220 мкм. При

глубине шлифования 0,015 мм в процессе затупления этих же кругов напряжения увеличиваются от 900—1150 МН/м² (90—115 кгс/мм²) до 1000—1200 МН/м² (100—120 кгс/мм²), а глубина распространения напряжений остается постоянной и равной 170—200 мкм. Таким образом, влияние затупления кругов на напряжения выражено особенно отчетливо при малых глубинах шлифования. При глубине шлифования 0,005 мм величина максимальных остаточных напряжений от затупления кругов увеличивается на 11—27%, а общая глубина распространения напряжений на 15—30%. При больших глубинах шлифования (0,015 мм) затупление кругов меньше влияет на напряжения: максимальные напряжения увеличиваются на 6—17%, а общая толщина напряженных слоев остается неизменной.

Величина максимальных остаточных напряжений и общая глубина распространения напряжений в 3—4 раза меньше при шлифовании деталей из отожженной стали У8, а при шлифовании деталей из закаленной стали У8 — в 1,1—1,5 раза, чем при шлифовании деталей из сплава ЖС6К [12]. Однако при шлифовании деталей из закаленной стали глубина распространения напряжений незначительно отличается от глубины распространения напряжений при шлифовании деталей из сплава ЖС6К. Таким образом, тепловой фактор при шлифовании деталей из сплава ЖС6К оказывает более сильное влияние, чем при шлифовании деталей из других жаропрочных сплавов и особенно из углеродистых сталей. Учитывая благоприятное влияние эффекта упрочнения на предел выносливости деталей, работающих при относительно небольших температурах, целесообразно применять в качестве окончательных операций абразивную обработку на низких скоростях.

Из изложенного выше следует, что величина, знак и характер распространения остаточных напряжений являются более чувствительными критериями оценки влияния различных технологических факторов, чем шероховатость и микротвердость, потому что последние мало изменяются в широком диапазоне условий шлифования.

Одним из главных факторов, влияющих на ресурс работы деталей, является структура поверхностных слоев после обработки. Условия возникновения структурных изменений сталей хорошо изучены. Поверхностные слои деталей из закаленной стали подвергают отпуску, если контактная температура шлифования ниже точек фазовых превращений, и вторично закаливают с отпуском, если температура выше точек фазовых превращений. Структурные изменения в поверхностных слоях деталей из сталей при шлифовании хорошо просматривались с помощью оптических микроскопов при увеличениях в 100 и 1000 раз. При шлифовании деталей из жаропрочных сплавов на хромоникелевой основе структурных изменений установить не удалось.

Легирование жаропрочных сплавов сильно повышает температуру (порог) рекристаллизации. Отношение температуры рекристаллизации к температуре плавления этих сплавов составляет (0,6÷0,8) $T_{пл}$ вместо 0,4 $T_{пл}$ [24], установленной для чистых металлов. Поэтому у большинства исследователей установилось мнение, что в процессе обработки резанием и, в частности, шлифования, структурных изменений в этих сплавах не может быть. Мнения основывались на результатах металлографических исследований, выполненных с помощью оптических микроскопов при увеличениях до 1000 раз. При этих увеличениях легко обнаруживаются структурные изменения в поверхностных слоях деталей из углеродистых сталей, потому что их толщина при шлифовании на различных режимах достигает 0,02—0,2 мм.

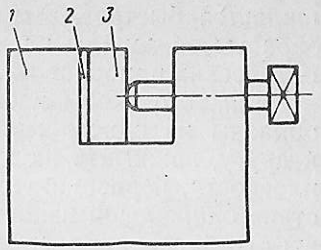


Рис. 25. Схема установки образцов при подготовке микрошлифов:
1 — струбцина; 2 — медная прокладка; 3 — образец

В поверхностном слое деталей из закаленного и прошедшего старение жаропрочного сплава могут происходить изменения фазового состава [25]: а) увеличение по сравнению с сердцевиной количества дисперсных фаз в результате их дополнительного выделения по поверхности сдвигов в момент шлифования (если процесс не достигает стадии полного обособления дисперсных фаз, то происходит их перегруппировка, предшествующая выделению); б) изменение химического состава дисперсных фаз в результате развития процессов окисления сплава вблизи поверхности.

При металлографических исследованиях на оптическом микроскопе с увеличением в 500 раз автору не удалось установить каких-либо структурных изменений. При исследовании скорость врезания круга изменялась от 0,1 до 0,2 мм/мин.

При увеличении в 1000 раз можно обнаружить только чрезвычайно большие изменения структуры при шлифовании деталей из сталей. Более тонкие изменения структуры, которые могут происходить при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов, можно обнаружить только с помощью электронного микроскопа.

Для сравнительной оценки исходного структурного состояния и тончайших поверхностных слоев после шлифования различными кругами наиболее отработанной является методика приготовления микрошлифов в плоскости, перпендикулярной шлифованной поверхности. Сущность этой методики состоит в том, что в струбцине (рис. 25) образцы закрепляют так, чтобы они выступали на 0,2—0,3 мм. Этот выступ необходим для предварительного выравнивания образцов на круге «заподлицо» со струбциной. Последующее выравнивание микрошлифов необходимо осуществлять на микронных шкурках с последующим полированием на фетровых кругах с окисью хрома. Между шлифованной поверхностью и стенкой струбцины ставится медная прокладка для того, чтобы при зажиме избежать деформации поверхности. Однако, как показывает опыт подготовки микрошлифов, медная прокладка изна-

шивается быстрее, чем исследуемый материал, вследствие чего образуются завалы на краю образца и затрудняется фокусировка оптических приборов на исследуемых участках.

Для того чтобы избежать завалов, целесообразно складывать образцы из одного металла шлифованными поверхностями друг к другу, зажимать их в струбцине и подготовлять микрошлифы в плоскости, перпендикулярной шлифованным поверхностям. Вследствие одинаковой износостойкости стыкованных образцов возможность образования завалов значительно уменьшается. Подготовленные образцы подвергают травлению химическими реактивами, промывают, сушат, после чего можно исследовать их структуру и субмикроструктуру. Так, для выявления интерметаллидной упрочняющей фазы $Ni_3(Ti, Al)$ в сплаве ЖС6К применяется следующий реактив: 92 см³ HCl, 5 см³ H_2SO_4, 3 см³ HNO_3.

На этих же образцах можно проводить локальные рентгеноспектральные исследования химического состава с применением микроанализаторов различных моделей: МАР-1, МАР-2 отечественного производства, «Камека», IXA-3A соответственно французской и японской фирм. Исследования необходимо начинать с малых увеличений, при которых можно оценить состояние нескольких зерен — общий вид структуры. Затем изучают структуру сплава внутри одного зерна при больших увеличениях, и для определения более тонких изменений фаз целесообразно провести электронно-микроскопические исследования. При увеличениях в 120 и 1050 раз под оптическим микроскопом видно, что размеры зерен сплава неодинаковы и колеблются в пределах 0,04—0,2 мм. При этих увеличениях в структуре сплава каких-либо изменений не обнаружено. Микрофотографии структуры тончайших поверхностных слоев жаропрочного сплава после шлифования и подготовки микрошлифов в сечении, перпендикулярном шлифованной поверхности, представлены на рис. 26, *а*. Состояние интерметаллидной фазы в тончайших поверхностных слоях (у линии разъема шлифованных поверхностей) не отличается от исходной структуры в сердцевине образцов (рис. 26, *б*).

Субмикроструктура сплава в слоях толщиной от 2 до 5 мкм

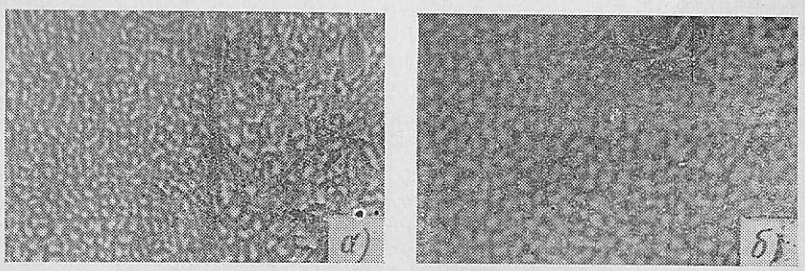


Рис. 26. Структура жаропрочного сплава:
а — поверхностных слоев после шлифования; *б* — исходного сплава; круг 34А 12 С1 6К; $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=15 м/мин; t=0,015 мм; ×1050

претерпевает значительные изменения. Например, после шлифования кругом 25А 16 С16К при глубине 0,005 мм размеры интерметаллидной упрочняющей фазы настолько уменьшаются, что создаётся впечатление частичного ее исчезновения в слоях толщиной до 5 мкм (рис. 27, *а*). При ужесточении условий шлифования путем

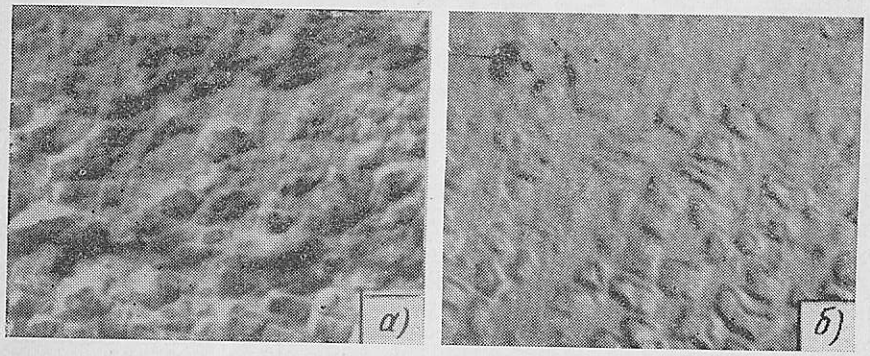


Рис. 27. Субмикроструктура сплава в тончайших поверхностных слоях после шлифования, ×39 600:
а — круг 25А 16 С1 6К; $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=15 м/мин; t=0,005 мм; *б* — круг 34А 12 С1 6К; $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=15 м/мин; t=0,015 мм

увеличения глубины резания до 0,015 мм и применении более мелкозернистого круга 34А 12 С16К интерметаллидная фаза на глубине 2 мкм исчезает (рис. 27, *б*). Микрофотография исходной субмикроструктуры сплава приведена на рис. 28. По-видимому, в первом случае тепловое воздействие было недостаточным, чтобы вызвать полное исчезновение упрочняющей фазы. В этих условиях формирования поверхностного слоя заметное влияние оказывает сила резания P_z; на рис. 27, *а* можно наблюдать ориентирование частиц измельченной упрочняющей фазы в направлении, параллельном вектору скорости. В момент, когда условия шлифования ужесточаются и усиливается тепловое воздействие на поверхностные слои металла, ориентированное расположение частиц фазы нарушается (рис. 27,*б*) и текстура исчезает. Обеднение поверхностного слоя сплава упрочняющей интерметаллидной фазой носит локальный характер. Одновременно с зонами, обедненными упрочняющей фазой, встречаются зоны, чрезвычайно насыщенные ею. Обеднение фазой, а также наруше-

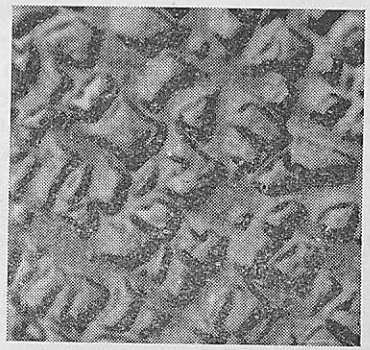


Рис. 28. Субмикроструктура исходного сплава, ×39 600

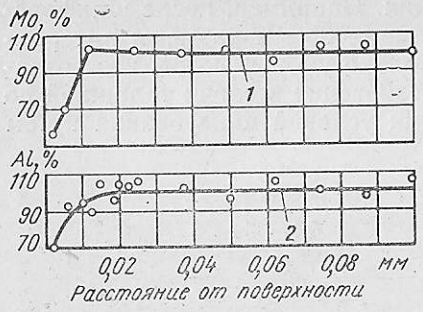


Рис. 29. Изменение содержания легирующих элементов в поверхностных слоях сплавов после шлифования кругом 34А 12 С1 6К; $v_к$=27,8 м/с; $v_д$=15 м/мин; t=0,015 мм:
1 — молибден; *2* — алюминий

ние стабильности структуры сплава в поверхностных слоях отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах деталей, особенно их ослабленных элементов. Предел выносливости деталей с обедненными поверхностными слоями может уменьшаться в 4 раза и более [24].

Чтобы установить природу структурных превращений, выявленных с помощью электронно-микроскопических исследований в тончайших поверхностных слоях после шлифования, применен рентгеноспектральный метод анализа химического состава сплава. Представляет интерес изучение перераспределений в поверхностных слоях алюминия и титана, которые входят в состав упрочняющей интерметаллидной фазы $Ni_3(Ti, Al)$, частично или полностью исчезающей при шлифовании, а также определить процентное содержание молибдена, который обеспечивает термическую стойкость твердого раствора и влияет на энергию связи атомов его кристаллической решетки. Исследование выполнено на локальном микроанализаторе «Камека». С помощью этой установки можно определить химический состав любого элемента в объемах до $1 \cdot 10^{-9}$ мм^3 с точностью до 0,05% и анализировать химический состав сплава в слоях толщиной 2 мкм.

Изменение процентного содержания алюминия и молибдена в поверхностных слоях приведено на рис. 29. По сравнению с исходным содержанием приятым за 100%, замечено уменьшение алюминия на 47%, молибдена на 48% и титана на 16% в слоях толщиной 0,01—0,012 мм. Обеднение слоев интерметаллидной фазой происходит в результате окисления алюминия и титана в условиях высоких температур и интенсивной деформации в зоне шлифования. Окисление алюминия и титана вызывает диффузионные перемещения этих элементов из более глубоких слоев твердого раствора к поверхности. Обеднение твердого раствора легирующими элементами вызывает растворение интерметаллидов $Ni_3(Ti, Al)$ и обеднение этой фазой поверхностных слоев на глубину до 0,001 мм. В результате проведенных исследований можно сделать некоторые выводы.

1. В тончайших поверхностных слоях жаропрочных сплавов при шлифовании осуществляются физико-механические и химические процессы, создающие значительные остаточные напряжения и структурные изменения, поэтому при выборе шлифовальных кругов и разработке технологии шлифования деталей, особенно

тяжело нагруженных, их необходимо контролировать с помощью методов и приборов, описанных выше.

2. Величина остаточных напряжений и глубина их распространения являются наиболее важными показателями качества поверхностных слоев при шлифовании. В зависимости от различных условий шлифования максимальные растягивающие остаточные напряжения изменяются в пределах 588—1274 МН/м^2 (60—130 кгс/мм^2) и иногда превышают предел прочности жаропрочного сплава на разрыв. На формирование остаточных напряжений выбранной марки сплава влияет в основном температура.

3. Шероховатость при равных условиях шлифования изменяется незначительно, поэтому она не отражает в достаточной степени тех изменений, которые происходят на шлифованной поверхности в зависимости от характеристики круга. Существенные изменения поверхности могут быть обнаружены только при исследованиях субмикрорельефа под микроскопом с большими увеличениями. Поперечные полосы, возникающие на поверхности в процессе затупления шлифовальных кругов, обнаруженные под электронным микроскопом, могут служить концентраторами напряжений, и по-видимому, отрицательно влияют на ресурс работы деталей.

4. Микротвердость поверхностных слоев в большинстве случаев мало изменяется при различных условиях шлифования, а степень упрочнения сплава — на 7—14% в широком диапазоне изменения основных составляющих режимов шлифования и степени затупления кругов. В силу того что микротвердость поверхностных слоев недостаточно четко отражает изменения в динамике шлифования, она не может служить надежным критерием оценки качества поверхности при выборе кругов и режимов шлифования.

5. Закономерности изменения остаточных напряжений и микротвердости в поверхностных слоях имеют одинаковый качественный характер. Остаточные напряжения и микротвердость максимальны соответственно на глубине 10—20 и 1,5—2 мкм от поверхности, поэтому особенно опасным является возникновение скрытого дефекта — трещины под шлифованной поверхностью деталей.

6. Субмикроструктура слоев толщиной 0,18—0,5 мкм претерпевает значительные изменения, которые могут отрицательно влиять на ресурс работы детали и требуют тщательного контроля при выборе кругов в различных стадиях затупления.

7. При разработке технологических процессов изготовления ответственных деталей, от которых зависит долговечность машины, рекомендуется проводить микроанализ химического состава тончайших поверхностных слоев.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУГОВ НА СИЛЫ РЕЗАНИЯ И КАЧЕСТВО ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Взаимосвязь основных критериев качества поверхностных слоев с силами резания и температурой шлифования

Взаимосвязь напряжений с силами и температурами хорошо выражается при исследовании влияния на эти показатели глубины шлифования. При увеличении глубины шлифования от 0,005 до 0,015 мм (рис. 30) вертикальная составляющая P_y силы резания увеличилась в 1,6 раза, горизонтальная составляющая P_z — в 1,35 раза, температура в зоне шлифования — в 1,3 раза, максимальные остаточные напряжения — в 1,7 раза, глубина распространения остаточных напряжений — в 1,5 раза. При глубине шлифования 5—15 мкм сила

$$P_z = 0{,}116 + 0{,}0085\, C_p\, t,$$

где C_p — размерный коэффициент; t — глубина шлифования, мкм.

По данным [11], $P_z = C_p t^a$, где $a = 0{,}37 \div 0{,}6$. Различные закономерности объясняются тем, что исследования [11] проведены с учетом подачи по лимбу, а не фактической глубины шлифования, и, кроме того, при шлифовании деталей только из сталей и чугуна. Силу шлифования при данном исследовании автор измерял с учетом фактической глубины шлифования. Была получена характеристика силы, учитывающая адгезионную составляющую силы трения. Горизонтальная составляющая P_z силы резания и контактная температура T°С при увеличении глубины шлифования увеличиваются пропорционально. Контактная температура [20]

$$T = \frac{P_z v_к}{0{,}885\, BE\sqrt{(\gamma_и c_и \lambda_и)}\, l\, (1 + k)},$$

где $v_к$ — скорость шлифовального круга, м/мин; B — ширина круга, м; E — механический эквивалент теплоты, Дж/Вт; $\lambda_и$ — коэффициент теплопроводности материала детали, Вт/(м·К); $c_и$ — удельная теплоемкость материала детали, Дж/(кг·К) $\gamma_и$ — плотность материала детали, кг/м³; l — длина дуги контакта круга с деталью;

$$k = \sqrt{\frac{\lambda_к c_к \gamma_к}{\lambda_и c_и \gamma_и}},$$

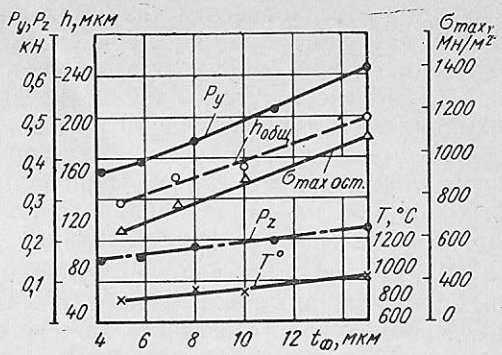


Рис. 30. Зависимость составляющих P_y и P_z силы резания, контактной температуры T°, максимальных остаточных напряжений σ_{max} и глубины $h_{общ}$ распространения напряжений в поверхностных слоях жаропрочного сплава от глубины шлифования t кругом 45А 12 СТ 9К; $v_к = 28$ м/с; $v_д = 15$ м/мин

где $\lambda_к$ — коэффициент теплопроводности круга, Вт/(м·К); $c_к$ — удельная теплоемкость круга, Дж(кг·К); $\gamma_к$ — плотность материала круга, кг/м³.

Данные рис. 30 подтверждают расчеты В. А. Хрулькова [25], что для жаропрочных сплавов эту формулу можно рассматривать только с целью выяснения принципиальной зависимости температуры в зоне контакта от параметров шлифования. Для расчета действительной температуры в зоне контакта при шлифовании деталей из жаропрочного сплава она непригодна, так как сила P_z в 2 раза больше, а коэффициент теплопроводности λ в 3—4 раза меньше, чем при шлифовании деталей из углеродистых сталей. В результате этого расчетные температуры получаются значительно более высокие, чем экспериментальные [25]. На точность расчетов температуры отрицательно влияет отсутствие коэффициентов теплопроводности кругов и шлифуемых материалов, соответствующих реальным условиям высоких мгновенно действующих температур и давлений. Величина максимальных остаточных напряжений и глубина их распространения увеличиваются приблизительно так же, как вертикальная составляющая P_y, и несколько интенсивнее, чем горизонтальная составляющая P_z силы резания и температуры T.

Используя рис. 30, в интервале глубин 5—15 мкм можно оценить влияние различных параметров на качество поверхности непосредственно в процессе шлифования по значениям составляющих P_y, P_z, силы резания или температуры.

Пути улучшения качества шлифованной поверхности

Абразивные зерна выполняют роль микрорезцов. От характера затупления микрорезцов и их взаимодействия с обрабатываемым металлом зависят работа трения и показатели качества поверхности. При выборе оптимального абразивного материала необходимо учитывать физико-механические и химические свойства контактируемых пар металл—абразив, от которых зависит характер их взаимодействия в процессе шлифования. В данном случае рассмотрим выбор абразивного зерна для трех наиболее распространенных групп материалов: закаленных легированных сталей, износ абразивов при обработке которых в значительной

степени протекает вследствие механического истирания и разрушения режущих кромок; прочновязких жаропрочных сплавов на хромоникелевой основе, обладающих адгезионными свойствами, при обработке которых затупление абразивов протекает из-за налипания металла на вершины зерен, и жаропрочных сплавов на основе титана, обладающих адгезионно-химической активностью по отношению к абразивам. При шлифовании деталей из титановых сплавов на износ абразивов влияет сложный комплекс физико-химико-механических явлений.

Шлифование деталей из труднообрабатываемых хромоникелевых сплавов и сложнолегированных инструментальных сталей целесообразно осуществлять шлифовальными кругами из корундовых абразивных материалов. В некоторых случаях при шлифовании деталей из легированных закаленных сталей твердостью *HRC* 62—65 наряду с корундовыми материалами целесообразно применять круги из карбида кремния, например мелкозернистые круги для резьбошлифования. Из корундовых материалов наиболее эффективным оказывается монокорунд в кругах со связкой № 1 [25]. Абразивный материал целесообразно выбирать для каждой группы обрабатываемых сплавов и сталей применительно к наиболее трудоемкой операции с последующим использованием положительных результатов на других операциях.

В соответствии с изложенным абразивные материалы для шлифования деталей из жаропрочного сплава ЖС6К выбираем применительно к обработке елочного профиля замка лопаток и для плоского врезного шлифования. Для шлифования деталей из инструментальных сталей абразивные зерна выбираем только для операции плоского шлифования.

Влияние вида абразивного зерна на процесс профильного шлифования деталей из сплава ЖС6К изучалось на кругах из монокорунда и электрокорундов: белого, хромистого и нормального с реакционноспособной связкой 51б, т. е. были взяты те виды абразивных зерен, производство которых освоено абразивной промышленностью, но нет систематизированных данных по сравнительной оценке их режущих свойств.

Характер изменения сил в процессе шлифования оценивался двумя критериями: значением сил шлифования и временем нормального шлифования до разрушения круга, т. е. до понижения сил. Износ шлифовальных кругов изучался при шлифовании елочного профиля замка лопаток турбины. За критерий износа принималось изменение радиуса закругления при вершине профиля шлифовального круга (рис. 31), которым прошлифовывалось дно канавки елочного профиля замка. Радиус закругления профиля круга увеличивался в процессе шлифования и копировался на детали, поэтому при изменении радиуса профиля дна канавки на деталях, прошлифованных за период стойкости шлифовального круга, можно было получить представление о механизме износа его режущей кромки. Радиус дна канавки измерялся с помощью микроскопа «Гартнер» с точностью 0,001 мм.

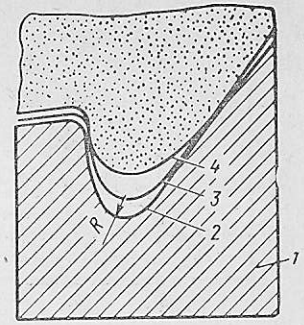


Рис. 31. Схема изменения профиля круга в процессе изнашивания:

1 — деталь; *2* — исходный профиль круга; *3* — профиль круга после 1,5 мин чистового шлифования; *4* — профиль круга после 3 мин чернового шлифования

Изменение сил резания и съема металла во времени показано на рис. 32. Наибольшие силы возникают в процессе шлифования кругами из белого электрокорунда. При шлифовании кругами из хромистого электрокорунда величина сил и время нормального шлифования несколько меньше, чем при шлифовании кругами из белого электрокорунда. Процесс шлифования кругами из нормального электрокорунда характеризуется меньшими значениями сил, чем при шлифовании кругами из материалов 25А и 34А. Время нормального шлифования всеми кругами 7—9 мин. Наименьшие силы и наибольшее время нормального шлифования получаются при обработке кругами из монокорунда.

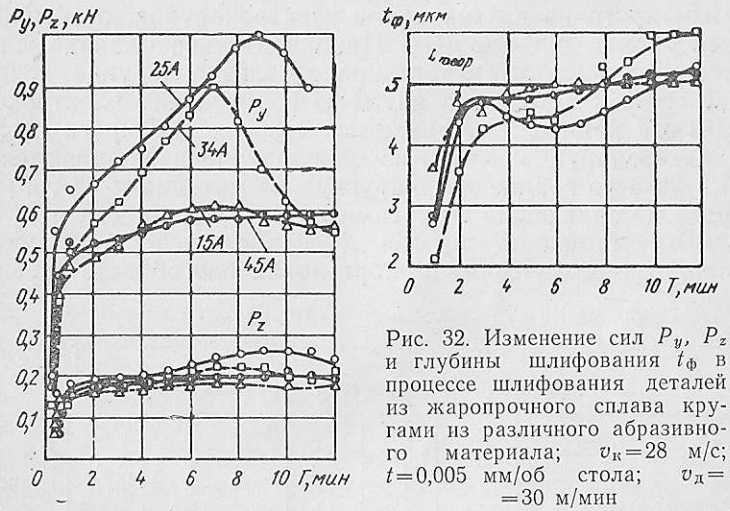


Рис. 32. Изменение сил P_y, P_z и глубины шлифования $t_ф$ в процессе шлифования деталей из жаропрочного сплава кругами из различного абразивного материала; $v_к$=28 м/с; t=0,005 мм/об стола; $v_д$=30 м/мин

От величины сил шлифования и характера их изменения зависят объем металла и отжимы в системе деталь — круг: большей силе P_y соответствуют большие отжимы и меньший съем металла. В результате меньших отжимов при шлифовании кругами из нормального электрокорунда и монокорунда достигается большая фактическая глубина резания, чем при шлифовании кругами из материалов 34А и 25А.

Изменение радиуса профиля, характеризующее износ режущих кромок кругов в разные периоды их стойкости, приведено на рис. 33. Радиус профиля кругов из материалов 25А, 34А (их износ)

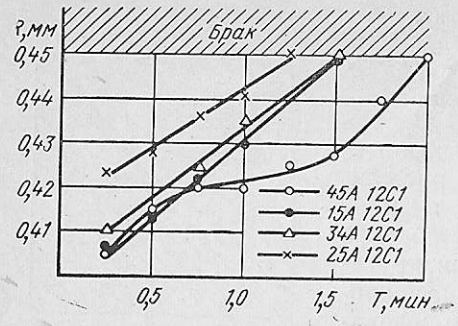


Рис. 33. Изменение радиуса профиля кругов из различного абразивного материала в процессе шлифования; $v_к=35$ м/с; $v_д=15$ м/мин; $t=0{,}005$ мм

увеличивается одинаково. Круги из монокорунда представляют исключение; начальный период шлифования после правки круга характеризуется интенсивным износом—радиус профиля резко возрастает. Причиной этого является выкрашивание плохо закрепленных зерен, полуразрушенных во время профилирования круга. Через 0,5—1 мин наступает нормальное шлифование без влияния правки. Нормальное шлифование характеризуется более плавным увеличением радиуса профиля по сравнению с начальным периодом. Затем износ круга снова возрастает из-за возникновения интенсивных вибраций и разрушения режущих кромок.

Круги из белого электрокорунда изнашиваются быстрее в 1,2 раза, чем круги из других видов электрокорунда, особенно в начальный период шлифования. Приблизительно одинаковый износ у кругов из хромистого и нормального электрокорунда. Некоторое отличие состоит в том, что круги из нормального электрокорунда в начальный период изнашиваются меньше, чем круги из хромистого электрокорунда. Круги из монокорунда изнашиваются меньше в 1,6 раза по сравнению с кругами из материала 25А и меньше в 1,4 раза по сравнению с кругами из материалов 15А и 34А.

На кромкостойкость кругов в наибольшей степени влияют прочность, микрохрупкость и абразивная способность зерен.

Таблица 2

Абразивная способность и прочность зерна

Материал зерна	Абразивная способность А	Прочность зерна, %	Предельная нагрузка $P_{р.в}$, гс	Микротвердость H_{100}	Модуль упругости $E\cdot10^{-5}$, кгс/см²	Предел прочности при разрыве $\sigma_в$, кгс/см²	Стойкость кругов, шт.
Электрокорунд:							
нормальный	0,1074	89,4	65	2320	4	105	6
белый	0,098	77	80	2420	4,1	105	5
хромистый	0,1	78	80	2570	4,4	111	6
Монокорунд	0,119	92,4	95	2420	4,3	109	8
Кубический нитрид бора (эльбор)	—	—	75—80	6000—9000	—	—	—

Абразивная способность и прочность зерен монокорунда на 18—21% выше по сравнению с зернами из нормального электрокорунда высшего качества. При наличии в кругах менее прочных зерен износ режущих кромок ускоряется, в результате чего происходит налипание металла на образовавшиеся при износе площадки. В связи с этим увеличиваются силы шлифования и остаточные напряжения, а также уменьшается объем металла из-за увеличенного отжима в системе деталь — круг.

Модуль упругости и предел прочности кругов из различных видов зерен на связке 51б различаются на 6—9%. В данном случае эти показатели не связаны с величиной износа. На характер износа шлифовальных кругов и силы резания влияет стабильность показателей прочности различных зерен.

В результате испытаний единичных зерен на прочность в условиях микрорезания по методике, разработанной Н. И. Богомоловым [4], установлены различные интервалы колебаний значений разрушающей нагрузки P_y и силы микрорезания P_z (табл. 3). Методика

Таблица 3

Значения P_y/P_z зерен различных образцов

Материал зерна	Номер зерна			
	1	2	3	4
Монокорунд	3	3	3	3
Электрокорунд:				
белый	4,5	2	3,5	3
хромистый	1,92	1,73	2,21	3,08
нормальный	2,1	1,87	1,55	1,78

заключается в том, что при микрорезании единичными зернами постоянно увеличивалась глубина микрорезания из-за постоянно увеличивающейся силы P_y до момента разрушения зерна. Сила P_y возрастала из-за постепенного увеличения количества песка, который медленно поступал из другой емкости.

Монокорунд, полученный в особых условиях, имеет более правильное кристаллическое строение и высокую стабильность прочностных характеристик по сравнению с другими абразивными материалами, полученными при дроблении блока и представляющими собой смесь поликристаллов и монокристаллов с различным предразрушением. В силу высокой стабильности прочностных показателей зерен монокорунда круги из него самозатачиваются более равномерно, а процесс шлифования характеризуется постоянством величин сил резания и наибольшим временем нормального шлифования.

На износ кругов, силы шлифования и съем металла влияют также и другие физико-механические свойства абразивов. Зерна из монокорунда кроме повышенных прочности и абразивной спо-

собности имеют более гладкие грани [9]. Повышенная гладкость граней, а также прочность монокорунда обусловлены технологическими условиями получения зерна. Отдельные абразивные частицы являются разобщенными кристаллами, которые не требуют дальнейшего измельчения. Шероховатость поверхности этих кристаллов меньше, чем шероховатость поверхности зерен, полученных путем механического дробления. При меньшей шероховатости поверхности зерен монокорунда скорость налипания металла на их вершины меньше, что способствует формированию более качественной шлифованной поверхности без следов адгезионного взаимодействия с абразивами и более плавного субмикрорельефа (см. рис. 16, *в*) по сравнению с кругами из хромистого корунда (см. рис. 16, *а* и *б*).

Для повышения качества поверхности и производительности при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов, обладающих незначительной химической активностью к абразивам, необходимо применять круги из зерен, обладающих высокой прочностью, абразивной способностью и низкой микрохрупкостью. При шлифовании кругами из монокорунда в различных стадиях их затупления силы P_y в 1,1—1,7 раза и силы P_z в 1,1—1,4 раза меньше по сравнению с кругами из других материалов. Во столько же раз будут меньше и остаточные напряжения. Износ круга из монокорунда в 1,4—1,6 раза меньше, а фактическая глубина шлифования приблизительно в 1,1 раза больше, чем глубина шлифования кругами их хромистого, нормального и белого электрокорунда.

В связи с тем что профильное шлифование замков лопаток осуществляется кругами, профиль которых задается и возобновляется путем накатки роликами, по экономическим соображениям пока нецелесообразно применять круги из эльбора и из других дорогих абразивов. Поэтому монокорундовые круги для этих целей, вероятно, будут применяться еще длительное время. Однако при обычном плоском шлифовании целесообразность применения кругов из эльбора очевидна. При одинаковых условиях шлифования со скоростью круга 16 м/с удельный съем металла в случае применения кругов из эльбора в 5 раз и более выше по сравнению с монокорундовыми кругами (табл. 4). Шероховатость шлифованной поверхности после эльборового шлифования $Ra=0{,}63\div0{,}5$ мкм (8а класса), в то время как при шлифовании монокорундовыми кругами $Ra=1\div0{,}63$ мкм.

Повышение скорости кругов из эльбора до 35 м/с при постоянстве других параметров режима шлифования способствует уменьшению их износа и повышению шероховатости поверхности до $Ra=0{,}2\div0{,}32$ мкм.

При шлифовании кругами из эльбора продольную скорость стола можно повысить до 17—24 м/мин, а следовательно, увеличить и минутный съем металла (производительность) при небольшой шероховатости поверхности. При шлифовании кругами из монокорунда и других видов корундов повышение скорости круга до 35 м/с или уменьшение продольной скорости стола приводит к

Таблица 4

Удельный съем металла кругами различных характеристик

$v_к$, м/с	$s_{пр}$, м/мин	Снимаемый припуск, мм	Удельный съем металла q	Минутный съем металла, мм³/мин	Ra, мкм
ЛО 20 СТ1 7К					
16	10	0,5	18	378	0,5—0,63
		5	15		1,25—1,6
		0,5	—		0,2—0,32
		2,5	38,2		0,63—0,8
35	17	0,5	—	650	0,25—0,4
		2,5	30,5		0,63—0,8
	24	0,5	—	920	0,32—0,63
		2,5	20		1—1,25
45А 25 СМ2 8К					
16	10	0,5	3,2	378	0,63—1
		2	3,8		1—1,25

Примечание. $t=0{,}01$ мм/дв. ход.

возникновению шлифовочных трещин; при шлифовании кругами из эльбора в широком диапазоне режимов шлифования трещины не возникают.

Преимущества эльборовых кругов при обработке деталей из сплава ЖС6К по сравнению с монокорундовыми кругами объясняются положительными физико-механическими свойствами эльбора. Твердость зерен эльбора в 2—3 раза выше твердости карбида кремния и корунда и приближается к твердости алмаза. Одновременно с этим по микрохрупкости и прочности эльбор не отличается от монокорунда.

Более высокие прочностные характеристики эльборовых зерен препятствуют их истиранию при шлифовании деталей из сплавов, содержащих в качестве упрочняющих фаз интерметаллиды, карбиды и другие соединения, твердость которых соизмерима с корундовыми абразивными материалами. Обладая кроме указанных свойств высокой инертностью по отношению к титану, входящему в состав жаропрочных сплавов, эльбор под действием сил резания разрушается с образованием микрорезцов, количество которых

образуется на 50% больше, чем у алмаза [23]. Это активизирует процесс микрорезания эльборовыми зернами по сравнению с алмазными и препятствует налипанию металла на поверхность зерен, особенно при шлифовании деталей из закаленных сталей.

Коэффициент теплопроводности эльбора в 2—3 раза выше коэффициента теплопроводности карбида кремния, что способствует повышению качества шлифованной поверхности вследствие отвода теплоты из зоны шлифования, особенно при обработке деталей из конструкционных материалов с низкой теплопроводностью, к которым относятся жаропрочные сплавы.

Абразивный материал для шлифования деталей из жаропрочных сплавов на титановой основе выбирают по результатам оценки износостойкости практически всех известных абразивных материалов в условиях микрорезания единичными зернами по методике [13]. Все исследованные абразивные материалы (табл. 5) можно

Таблица 5

Характеристика кругов

Материал зерен	Предельная нагрузка	Износостойкость при микрорезании L, м	Удельная производительность кругов q
Нормальный электрокорунд (15А)	65	0,12	—
Электрокорунд (25А)	80	0,14	0,12—0,4
Электрокорунд хромистый (34А)	80	0,15	0,2—0,5
Монокорунд (45А)	95	0,18	0,4—1
Карбид кремния:			
зеленый (63С)	25	1,24	2,3—2,9
черный (54С)	35	1,73	3—4
Карбид вольфрама (WC)	200	4,86	6—9,2
Эльбор:			
поликристаллический (ЛО)	75—80	14,5	—
монокристаллический	—	56	—
Алмаз синтетический (АСК-50)	—	66	—

разделить по износостойкости при микрорезании титанового сплава на следующие группы: абразивы малой износостойкости (группа корундов), абразивы средней износостойкости (карбиды) и износостойкие абразивные материалы, к которым относятся синтетический алмаз и кубический нитрид бора.

Существует связь механических свойств абразивов с их износостойкостью и режущей способностью кругов; чем меньше микрохрупкость, тем выше износостойкость зерен и режущая способность кругов. Однако эта связь нарушается при совместном анализе результатов исследований корундов и карбидов; менее хрупкие корунды оказываются менее износостойкими по сравнению с более хрупкими карбидами, за исключением карбида вольфрама [5]. Это объясняется резким охрупчиванием поверхности корундовых зерен после взаимодействия с титановым сплавом при микрорезании. После микрорезания деталей из титанового сплава со скоростью

30 м/с микротвердость корунда уменьшается приблизительно на 30%, а микрохрупкость резко увеличивается (табл. 6).

Таблица 6

Микротвердость и микрохрупкость абразивных материалов в различном состоянии

Материал детали	v, м/с	Корунд после работы при H 2790 и $P_{р.в}$ = 80 гс в исходном состоянии		Карбид кремния после работы при H 3450 и $P_{р.в}$ = 25 гс в исходном состоянии	
		H	$P_{р.в}$, гс	H	$P_{р.в}$, гс
Армко-железо	2	2790	80	3450	—
	30	2650			
Титановый сплав	2	2790			25
	30	2200	20	3000	40

Микротвердость H определена при нагрузке на индентор 40 гс, а при указанных нагрузках $P_{р.в}$ равновероятно появление отпечатков с трещинами и без них.

Увеличение микрохрупкости и катастрофический износ корунда обусловлены образованием продуктов реакции на его поверхности; с помощью микроанализа на поверхности инденторов корунда после микрорезания титанового сплава выявлены следы чистого алюминия, что свидетельствует о реакции восстановления. Вероятно, на поверхности корунда образуются другие продукты реакции, например интерметаллиды, микрохрупкость которых значительно выше микрохрупкости корунда в исходном состоянии. В результате химического взаимодействия с титаном поверхность корунда покрывается сеткой трещин и субмикротрещин, интенсифицирующих в дальнейшем лавинное разрушение абразивов под действием сил микрорезания.

Корундовые абразивные материалы не обеспечивают высококачественной обработки деталей из титановых сплавов и требуемой точности при высоких скоростях круга. Поэтому круги из корундовых материалов рекомендуется применять при скоростях не более 12—15 м/с, при которых физико-химические изменения поверхности абразивов влияют в меньшей степени на износ абразивов и качество шлифованной поверхности.

При шлифовании кругами из карбидов (карбида кремния черного и зеленого, а также из карбида вольфрама) обеспечивается более высокий удельный съем металла по сравнению с корундами (см. табл. 5) при одновременном обеспечении высокого качества шлифованной поверхности. Однако тончайшие поверхностные слои деталей из титановых сплавов после шлифования насыщаются элементами, входящими в состав абразивов (кремнием, вольфрамом).

После шлифования деталей из титановых сплавов кругами из карбида кремния концентрация кремния увеличивается от 0,4 до 1% [19].

Диффузионные и химические процессы на контактных поверхностях эльбор—титановый сплав протекают значительно слабее, чем при микрорезании корундовыми и карбидокремниевыми абразивами. Об этом свидетельствуют результаты исследования поверхности острия из эльбора после микрорезания и химического стравливания налипшего металла, в результате которого были обнаружены следы титана. Изменения микрохимического состава эльбора настолько незначительны, что практически не влияют на их прочностные свойства.

Преимущества эльбора по сравнению с корундовыми и карбидо-кремниевыми абразивами проявляются при шлифовании деталей из различных титановых сплавов кругами на керамической связке; при шлифовании кругами на бакелитовой связке преимущества эльбора не реализуются вследствие недостаточной прочности удержания зерна связкой. В процессе шлифования кругами из эльбора на керамической связке удельный объем металла в 10 раз более высокий по сравнению со съемом при шлифовании кругами из карбида кремния. Эти преимущества проявляются при различных скоростях круга в пределах 16—36 м/с. С повышением скорости кругов удельный съем металла увеличивается. Однако шлифование без прижогов обеспечивается только при скоростях до 30 м/с.

Испытания кругов из эльбора характеристики ЛО 20 СТIК при режимах $v_к=24$ м/с, $s_{пр}=15$ м/мин, $t=0{,}01$ мм на двойной ход стола показали, что при обработке деталей из сплава ВТ9 можно сошлифовать без прижогов припуск 5 мм, при этом шероховатость поверхности $Ra=0{,}63\div1{,}25$ мкм.

При съеме припуска 1 мм и менее шероховатость шлифованной поверхности $Ra=0{,}32\div0{,}63$ мкм. Удельный расход эльбора при указанном режиме шлифования составляет 4,5—5 мг/г, т. е. экономически оправдан, как при шлифовании деталей из закаленных инструментальных сталей.

Круги из карбида кремния оптимальных характеристик наряду с меньшим (в 10 раз) удельным съемом металла обеспечивают более шероховатую поверхность по сравнению с эльборовыми кругами, а прижоги возникают при съеме припуска меньше 1 мм.

Преимущества зерен монокорунда и эльбора по сравнению с другими абразивами проявляются при шлифовании изделий из труднообрабатываемых инструментальных сталей. При шлифовании изделий из инструментальных сталей различных марок целесообразно применять круги из монокорунда, которые обеспечивают повышение удельного съема металла в 1,5—2 раза и более по сравнению с шлифованием кругами из белого электрокорунда. Кроме того, стойкость монокорундовых кругов по времени бесприжогового шлифования оказывается в 1,5—2 раза выше стойкости кругов из различных видов корундов. Улучшение качества шлифованной поверхности способствует повышению долговечности шлифованных инструментов. Удельный съем металла, стойкость кругов и качество поверхности при шлифовании кругами из эльбора выше, чем при шлифовании кругами из монокорунда. Преимущества кругов из эльбора в наибольшей степени проявляются при обработке деталей из сложнолегированных термически обработанных сталей и сплавов, в состав которых входят карбиды, нитриды, бориды и др., твердость которых равна 2000—2160 кгс/мм² и приближается к твердости обычных абразивов.

Сравнительная оценка кругов из монокорунда, электрокорунда, карбида кремния и эльбора при шлифовании деталей из сталей Р18Ф2К10М2 и Р12Ф5М показывает (табл. 7), что удельная производительность при шлифовании кругами из эльбора с глубиной 0,01 мм в 150 раз и более выше, а при глубине шлифования 0,03 мм в 50 раз выше по сравнению с удельной производительностью кругов из монокорунда. При шлифовании кругами из эльбора минутный съем металла в 2—3 раза выше по сравнению с шлифованием кругами из монокорунда [10].

Таблица 7

Результаты шлифования кругами различных характеристик при режиме $v_к=35$ м/с, $v_д=30$ м/мин, $s_{пр}=0{,}5$ м/мин

Характеристика кругов	Съем металла (производительность) Q, мм³/мин		Удельная производительность q		Стойкость круга между правками, мин	
	при t, мм					
	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
45А 25 СМ1 8К	180	475	0,56	0,47	8,5	1,7
63 С 25 СМ1 8К	209	539	0,42	0,37	4,8	2
25А 25 СМ2 10К	122	374	0,25	0,2	2,9	1
Л12Б1, 100%	405	762	82,5	26,5	—	—

Исследования качества шлифованной поверхности образцов из стали Р12Ф4К10М2, прошлифованных на плоскошлифовальном станке 3701 кругами указанных характеристик, показали, что остаточный аустенит при шлифовании кругами из эльбора не образуется, в то время как при шлифовании кругами из зерен других видов его количество достигает 45% [10].

Значительные преимущества кругов из эльбора по сравнению с кругами из белого, хромистого электрокорунда и монокорунда выявлены и при плоском шлифовании образцов из стали Р9Ф5 (*HRC* 63—65). Удельная производительность при шлифовании кругами из эльбора характеристики Л8КБ, 100% получается в 60—100 раз выше, чем корундовых [14] при съеме металла 3000 мм³ с использованием в качестве СОЖ 3%-ного водного раствора эмульсола НГЛ-205 на режимах $v_к=30$ м/с, $s_{пр}=12$ м/мин, $s_{поп}=0{,}5$ мм/ход, $t=0{,}02\div0{,}04$ мм. Круги из корундовых материалов характеристик Э9А25СМ2К8, ЭХ40СМ1К6, М840М3К при шлифовании производи-

тельностью 240 мм³/мин быстро затупляются и их необходимо править, так как на шлифованной поверхности возникают прижоги и фактический съем металла становится меньше заданного на 40%. Круги из эльбора до их полного износа править не нужно, так как они стабильно обеспечивают высокое качество шлифованной поверхности.

Снижение температуры особенно заметно при шлифовании кругами из эльбора резьбы ходовых винтов из стали ХВГ (*HRC* 58—60) длиной до 2000 мм, где одним из важных факторов являются температурные деформации винта. Температурные деформации при шлифовании кругами из эльбора в 2—7 раз меньше, чем при шлифовании корундовыми кругами [16].

В результате перечисленных преимуществ кругов из эльбора их применение, несмотря на высокую стоимость, по сравнению с обычными абразивами экономически целесообразно.

Для исследования влияния типа связки на силы шлифования были изготовлены шлифовальные круги из нормального электрокорунда на реакционноспособной связке 51б и связке 853. Реакционноспособная связка должна обеспечить химико-механическое закрепление зерна в отличие от механического закрепления обычными связками.

Изменение составляющих сил резания в зависимости от типа связки приведено на рис. 34. При шлифовании кругами на реакци-

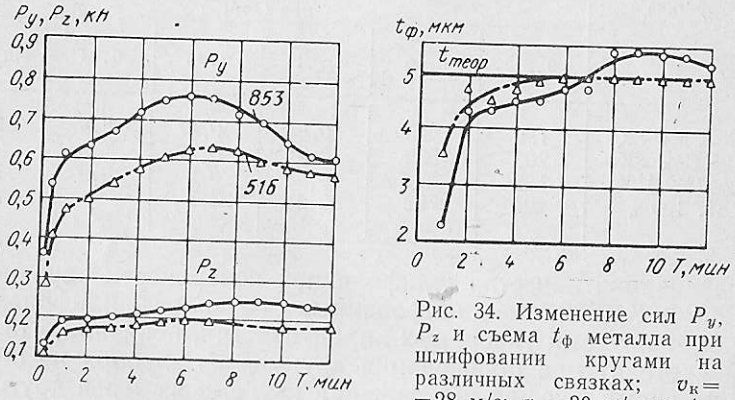


Рис. 34. Изменение сил P_y, P_z и съема $t_ф$ металла при шлифовании кругами на различных связках; $v_к$=28 м/с; $v_д$=30 м/мин; t=0,005 мм/об. стола

онноспособной борсодержащей связке 51б силы P_y и P_z в 1,1—1,3 раза меньше по сравнению с кругами на связке 853. Время нормального шлифования без интенсивных вибраций приблизительно одинаково и равно 6—7 мин. Съем $t_ф$ металла в случае шлифования кругами на реакционноспособной связке приблизительно на 9% больше, по-видимому, из-за меньших отжимов в системе деталь — круг. Износ шлифовальных кругов на связке 51б значительно меньше по сравнению с износом кругов на связке 853. Измерения радиуса дна канавки елочного профиля замка лопаток, про-

шлифованных кругами с различными связками, показывают, что у кругов на связке 51б радиус сопряжения увеличивается до предельного значения 0,45 мм за 1,25 мин шлифования, а у кругов на связке 853 за 15 с., т. е. скорость износа последних в 5 раз больше.

Преимущества кругов на реакционноспособной связке можно объяснить их физико-механическими свойствами. Несмотря на меньшее количество связки 51б, предел прочности кругов на разрыв на связке 51б на 25% больше по сравнению с пределом прочности кругов на связке 853. Круги на реакционноспособной связке более эластичны, так как их модуль упругости приблизительно на 20% ниже по сравнению с кругами на связке 853. Эти свойства, очевидно, уменьшают износ шлифовальных кругов, силы резания и соответственно остаточные напряжения. Эффект снижения работы трения за счет уменьшения количества связки подтвержден при шлифовании деталей из жаропрочных титановых сплавов кругами из карбида кремния на связках с химически активными добавками.

Применение реакционноспособной связки IIIК (третий корундовый) с добавками окиси бора в кругах из карбида кремния позволило при твердости С2 уменьшить количество связки на 30% по сравнению с обычной связкой IIIК; вследствие этого работа трения уменьшилась на 25% [7]. При использовании мягких кругов твердостью М3 преимущества реакционноспособной связки выражены значительно слабее, чем при использовании твердых кругов, вследствие их интенсивного износа. Применение кругов с уменьшенным содержанием связки позволяет уменьшить время шлифования до возникновения прижогов приблизительно на 30% при одновременном повышении качества шлифованной поверхности и обеспечении необходимой точности деталей.

В соответствии с принятой в абразивной промышленности классификацией структур для исследования влияния структуры кругов на силы резания и другие показатели процесса шлифования были изготовлены круги 4, 6 и 9-й структур из хромистого электрокорунда. Изменение составляющих силы резания в зависимости от времени шлифования приведено на рис. 35. Наименьшие силы возникают при шлифовании кругами 9-й структуры, а наибольшие — при шлифовании кругами 6-й структуры. Промежуточные значения сил — при шлифовании кругами 4-й структуры. При шлифовании кругами 4-й структуры время нормального шлифования до разрушения круга минимальное и равно 5—6 мин, кругами 6-й структуры — 7 мин и 9-й структуры — 9 мин. Круги низких структур менее пригодны для качественной обработки деталей из жаропрочных сплавов по сравнению с кругами 6-й структуры, хотя при шлифовании ими возникают несколько меньшие по величине силы.

Наличие большого количества зерна в кругах низких структур вызывает большую работу трения в процессе шлифования и интенсификацию процесса налипания металла. Казалось бы, что круги 4-й структуры должны больше изнашиваться из-за возникающих интенсивных вибраций, однако круги низких структур изнашиваются меньше. Закономерности износа шлифовальных кругов разных

структур приведены на рис. 36. У кругов 4-й структуры скорость износа в 1,4 раза меньше, чем у кругов 6-й структуры, и приблизительно в 1,7 раза меньше, чем у кругов 9-й структуры. Износ кругов различных структур (их абразивная способность) находится в

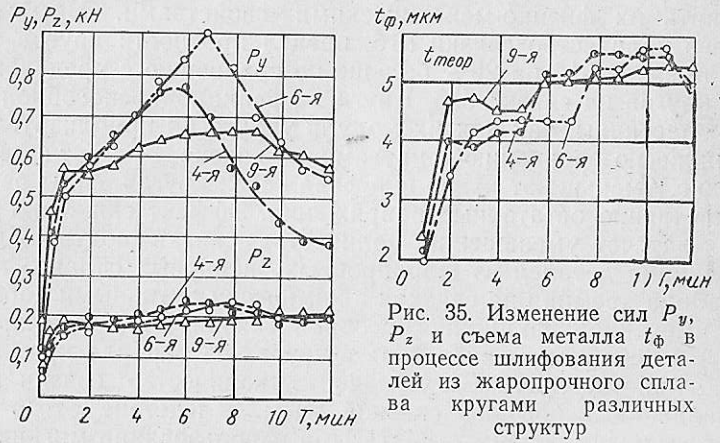


Рис. 35. Изменение сил P_y, P_z и съема металла $t_ф$ в процессе шлифования деталей из жаропрочного сплава кругами различных структур

прямой зависимости от количества зерна в круге. В силу того что в единице объема круга высокой структуры содержится больше связки, ее более легко равномерно распределить по всему объему круга в процессе изготовления, чем при низкой структуре. В связи с этим круги высокой структуры обладают более стабильными свойствами и равномерной твердостью по сравнению с кругами низкой структуры. Равномерное распределение связки в кругах высоких структур обеспечивает более однородную прочность закрепления зерен в них и соответственно более равномерное самозатачивание зерен при шлифовании, уменьшающее налипание металла и силы резания. Таким образом, круги высоких структур являются более предпочтительными в том случае, когда необходимо получить высокое качество шлифованной поверхности деталей из жаропрочных сплавов. На основании результатов проведенных исследований были изготовлены, апробированы и внедрены в производство шлифовальные круги из монокорунда 9-й структуры на связке 51б.

На основе изложенного выше можно сформулировать следующие основные положения. Остаточные напряжения и глубина их распространения, являющиеся одними из главных критериев качества шлифованной поверхности деталей из жаропрочных

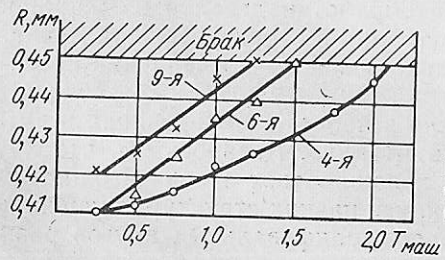


Рис. 36. Изменение радиуса профиля шлифовальных кругов в процессе шлифования; $v_к=35$ м/с; $v_д=15$ м/мин; $t=0,005$ мм/об. стола

сплавов, находятся в прямой зависимости от силы резания.

Для шлифования сплавов на хромоникелевой основе, в том числе для профильного шлифования, рекомендуется выбирать круги из наиболее прочного и износостойкого корундового абразива — монокорунда. При шлифовании кругами из монокорунда составляющие силы резания получаются меньше: P_y в 1,1—1,7 раза и P_z в 1,1—1,4 раза, а кромкостойкость в 1,6—1,4 раза выше по сравнению с кругами из белого и хромистого электрокорундов. Для обычного шлифования (плоского, круглого, внутреннего) целесообразно применять круги из эльбора, стойкость которых и удельная производительность шлифования в 5 раз и более выше, чем при шлифовании деталей из хромоникелевых сплавов кругами из монокорунда.

Шлифование химически активных сплавов на основе титана необходимо осуществлять кругами из наиболее инертных и прочных абразивов — карбида кремния, эльбора и алмаза. Стойкость и удельная производительность кругов из карбида кремния в случае оптимальной характеристики и режимов шлифования при скорости $v_к=24\div30$ м/с на порядок выше, чем кругов из корунда. Применение кругов из эльбора обеспечивает еще более высокие (на порядок выше) показатели процесса шлифования без прижогов деталей из жаропрочных сплавов на основе титана (стойкость кругов, удельная производительность) при одновременном повышении шероховатости поверхности.

При шлифовании деталей из инструментальных сталей установлено, что стойкость кругов из монокорунда по времени шлифования без прижогов в 1,5—2 раза выше стойкости электрокорундовых кругов. Круги из эльбора обеспечивают высококачественное шлифование до своего полного износа при удельной производительности в 50—150 раз более высокой, чем производительность шлифования кругами из различных корундов.

Для повышения кромкостойкости кругов и качества шлифованной поверхности деталей из жаропрочных сплавов рекомендуются круги на реакционноспособных связках, обеспечивающих при их меньшем количестве более прочное закрепление зерна при одновременном уменьшении составляющих силы резания и времени шлифования без прижогов в 1,3 раза и более по сравнению с обычными связками.

Для высококачественного шлифования деталей из жаропрочных сплавов рекомендуются круги высоких структур. При повышении номера структуры кругов от 5-й до 9-й их кромкостойкость хотя и уменьшается в 1,4—1,7 раза за счет уменьшения количества зерна и увеличения количества связки, силы резания и вибрации при затуплении кругов возрастают в меньшей степени по сравнению с кругами низких структур, что обеспечивает формирование поверхности без трещин с меньшими остаточными напряжениями.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КРУГОВ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Точность обработки, стойкость кругов и время шлифования без прижогов инструментальных сталей

Комплексные исследования процесса шлифования деталей из жаропрочного сплава типа ЖС, позволившие определить основные пути уменьшения сил P_y и P_z, послужили основой выбора кругов в производственных условиях.

Шлифование деталей из инструментальных сталей с высокими классом точности и качеством поверхности сопряжено со значительными трудностями. Точность шлифуемых инструментов сложной формы можно достигнуть путем подбора более твердых кругов, обладающих повышенной кромкостойкостью. Однако в твердых кругах содержится больше связки, вследствие чего увеличивается работа трения и на шлифованной поверхности возникают прижоги. В этом случае стойкость кругов ограничивается моментом появления прижогов. Шлифованная поверхность с локальным изменением структуры в зоне прижога характеризуется низкой работоспособностью вследствие ухудшения ее механических характеристик. Возникновение прижогов, например, на поверхности зубьев шестерен снижает их ресурс на 30%. По указанным причинам вариант повышения кромкостойкости кругов путем увеличения их твердости применять нельзя.

Из-за исключительно высокой склонности к прижогам детали из новых марок инструментальных сталей необходимо шлифовать довольно мягкими кругами, несмотря на их низкую кромкостойкость. В ряде случаев при шлифовании деталей из таких сталей, как стали Р9Ф5, Р18Ф2К8М, даже мягкие круги не обеспечивают качественную поверхность. Таким образом, шлифование деталей из труднообрабатываемых инструментальных сталей в значительной степени зависит от создания шлифовальных кругов, обладающих высокой кромкостойкостью при минимальных значениях составляющих P_y и P_z силы резания.

Опыт работы и внедрения результатов исследовании в инструментальных производствах различных машиностроительных заводов показывает, что этим требованиям отвечают круги из монокорунда на реакционноспособной связке 51б, 8—9-й структуры (табл. 8).

Таблица 8

Шлифовальные круги из монокорунда для различных операций шлифования инструментов

Операция	Абразивный инструмент в зависимости от варианта технологии		Стойкость кругов, %
	первого	второго	
Шлифование мелкомодульных долбяков из стали Р10К5Ф5	1Т275×20/2×127 25А 10 СМ1 7К	1Т275×20/2×127 45А 10 СМ1 9К	170
Заточка зубьев протяжек из сталей Р9Ф5, Р9К5, Р9К10	1Т150×20×32 25А 16 СМ 2К	1Т150×20×32 45А 12 СМ1 К	130
Заточка фрез из стали Р18	1Т150×20×32 25А 16 СМ1 25А 25 СМ1	1Т150×20×32 45А 12 СМ1—СМ2	150
Заточка круглых плашек из стали Р18	1Т150×20×32 25А 16 СМ1 25А 25 СМ1	1Т150×20×32 45А 12 СМ1—СМ2	150
Заточка шарошек	ПП150×6×32 25А 10 СМ1—СМ1	ПП150×20×32 45А 12 СМ1—СМ2	150
Заточка боковых углов резцов из стали Р18	ПП250×40×75 25А 16 М3—СМ1	ПП250×25×75 45А 12 М3—СМ1	240
Шлифование фасонных резцов из сталей Р9, Р12, Р18	ПП250×25×75 25А 25 СМ1 К	ПП250×25×75 45А 12 СМ1—М3 К	150
Шлифование центровок из стали Р18 Прорезка канавок при шлифовании протяжек из стали Р24	ПП150×20×32 25А 16—25 СМ2 К 2П250×20×32 25А 25 СМ2 К	ПП150×20×32 45А 16—12 СМ2 9К 2П250×20×32 45А 25 СМ2 К	150—200 200
Плоское шлифование инструментов из стали Р18Ф2К8М	ПП250×25×75 25А 25 СМ1—СМ2 К	ПП250×25×75 45А 25 СМ1 9К	150
Заточка резцов проходных из стали Р18 Заточка передней поверхности зубьев протяжек из стали Р18М	ПП200×20×32 25А 25 СМ2 К 1Т150×16×32 25А 16 М3 8К	ПП200×20×32 45А 25 СМ2 К 1Т150×16×32 45А 16 М3 8К	200 150—200

Стойкость кругов из монокорунда в 1,3—1,5 раза и более выше, чем кругов из белого электрокорунда. За критерий стойкости кругов принималось время шлифования без дефектов поверхности — время шлифования без прижогов с заданной точностью. Испытания фасонных резцов из сталей Р9, Р12 и Р18 после заточки монокорундовыми кругами показали, что их стойкость увеличивается на 30—40% по сравнению с резцами, заточенными электрокорундовыми кругами.

Использование кругов из эльбора при шлифовании инструментов различного назначения повышает качество шлифованной поверхности, точность и долговечность, а также стойкость кругов в 20—200 раз. При этом производительность обработки в 2 раза выше по сравнению с кругами из различных абразивов, в том числе из монокорунда.

Основная операция, на которой успешно внедрены круги из эльбора, — заточка инструмента. На этой операции применяют круги на связках КБ, Б1, Б156 100%-ной концентрации, обладающие способностью быстро прирабатываться и не требующие правки в течение всего периода стойкости до полного износа. В частности, на операциях заточки передних поверхностей инструментов со спиральным зубом для получения шероховатости $Ra=0{,}16\div0{,}32$ мкм применяют круги зернистостью Л5—6, а для получения шероховатости $Ra=0{,}32\div0{,}63$ мкм — зерностойкостью Л8—10. В качестве СОЖ используют водный раствор, содержащий 0,8% триэталонамина и 0,5% нитрида натрия.

Для резьбошлифования (однониточного скоростного и глубинного, многониточного врезного и на проход) предлагаются круги из эльбора диаметром 350—500 мм на органических, керамических и металлических связках. Однониточное резьбошлифование керамическими кругами из эльбора, применяющееся более широко, чем многониточное, осуществляется с небольшой скоростью изделия и относительно большими подачами на глубину. Резьба с шагом 1 мм на метчиках шлифуется по целому за один-два прохода, а если шаг резьбы более 1 мм — за два-три прохода. Для резьбошлифования применяются круги из эльбора 100%-ной концентрации твердости СТЗ-Т1 независимо от шага резьбы. С уменьшением шага резьбы от 1,5 до 0,5 мм рекомендуется на каждые 0,5 мм шага уменьшать на одну-две зернистость, т. е. от Л6—Л8 соответственно до ЛМ20—ЛМ28.

Применение кругов при режимах шлифования $v_к=35\div42$ м/с, $v_и=16\div0{,}3$ м/мин, $t_{черн}=0{,}4\div0{,}5$ мм, $t_{чист}=0{,}1\div0{,}15$ мм с применением кругов указанных выше характеристик позволило шлифовать резьбу на инструментах из труднообрабатываемых сталей Р9Ф5, Р12Ф5М, Р12Ф4К10М2, Р18Ф2К8М и др., достигнув обрабатываемости этих сталей не ниже, чем стали Р18. Кругами из эльбора шлифуют также другие инструменты из труднообрабатываемой стали Р9Ф5 — круговые, круглые и шлицевые протяжки, шеверы с корригированным зубом. В каждом конкретном случае в соответствии с состоянием имеющегося оборудования рекомендуется подбирать режимы шлифования, обеспечивающие технические требования производства при использовании преимуществ прогрессивного инструмента из эльбора.

Для многониточного резьбошлифования освоены и применяются круги диаметром до 400 мм, правка которых осуществляется так же, как и абразивных кругов, накатными роликами при скорости вращения 0,2—2 м/мин, подаче на глубину до 0,05 мм и времени выхаживания на каждую подачу 2 мин.

Как показывает опыт внедрения процесса многониточного резьбошлифования гребенок из стали Р6М5 (*HRC* 62) кругами из эльбора типоразмера ПП400×25×203×10 характеристики Л4СМ2—С1К, можно достигнуть повышения стойкости этих кругов в 7 раз по сравнению с кругами из К3 при одновременном повышении точности геометрических параметров и качества шлифованной поверхности [26].

Качество шлифованной поверхности и долговечность турбинных лопаток из жаропрочных сплавов

Апробирование и внедрение результатов исследований процесса шлифования деталей из жаропрочных сплавов проводилось на операциях предварительной и окончательной обработки елочного профиля замка турбинных лопаток и плоских деталей.

При шлифовании елочного профиля замка лопаток в некоторых случаях появляются трещины, шлифовальные круги быстро теряют режущую способность и не обеспечивают высокой точности шлифуемого профиля. Шлифовочные трещины в процессе эксплуатации возникают, как правило, на полке *С* замка лопаток, а иногда и на вершинах зубьев (рис. 37). Одной из основных причин трещинообразования является увеличение остаточных напряжений вследствие затупления шлифовальных кругов. Наблюдения за поверхностью круга показывают, что характер его затупления на разных участках профиля разный. Зерна на вершине зуба *А* испытывают при шлифовании большие нагрузки, чем зерна боковых граней профиля *Б*, так как основной припуск металла сошлифовывается зернами на вершинах зубьев. В связи с этим зерна на вершинах зубьев интенсивно самозатачиваются и частично притупляются, а на боковых поверхностях профиля в большей степени притупляются и в меньшей степени самозатачиваются. Затупление зерен сопровождается налипанием металла на их режущую поверхность, разрушением круга, возникновением интенсивных вибраций и в

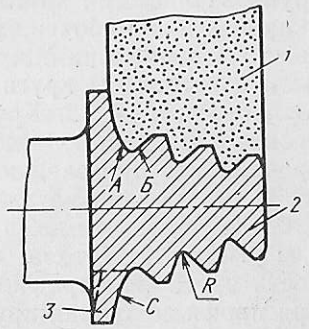


Рис. 37. Схема шлифования елочного профиля замка лопаток:

1 — круг; *2* — замок лопатки; *3* — образец для определения остаточных напряжений

результате ухудшением качества поверхности. Налипание особенно заметно на поверхности круга, которая сошлифовывает металл с полки *С* замка лопатки. Чтобы повысить качество шлифованной поверхности на данной операции, необходимо иметь такой шлифовальный круг, который бы в первую очередь не «засаливался» по боковым поверхностям зуба и обладал достаточно высокой кромкостойкостью. Попытки технологов уменьшить налипание металла на боковых поверхностях профиля круга путем уменьшения его твердости при постоянстве остальных показателей характеристики приводят к уменьшению кромкостойкости. Увеличение кромкостойкости круга в результате повышения его твердости сопровождается трещинообразованием на шлифуемой поверхности детали.

Для повышения эксплуатационной надежности и ресурса работы елочный профиль замка лопаток шлифуют кругами из монокорунда. Характеристика шлифовальных кругов приведена в табл. 9.

Таблица 9

Характеристика шлифовальных кругов ПП400×20×127

Характеристика	Количество связки, вес. частей	Средняя глубина лунки, мм
45А 12 С2 9К 51б	14	4,0
45А 12 С1 9К 51б	13,5	4,57
45А 12 СМ29К 51б	12,4	5
25А 16 С1 7К (серийный)	17	4,4
25А 16 С2 7К (серийный)	19,5	3,9

При шлифовании елочных профилей целесообразно применять мелкозернистые круги средней твердости и даже мягкие. В этом случае по периметру шлифуемого профиля располагается большее количество абразивных зерен, отчего кромкостойкость кругов может быть значительно увеличена по сравнению с крупнозернистыми кругами. Чтобы исключить образование трещин в процессе обработки, твердость мелкозернистых кругов необходимо уменьшить на одну-две степени. Учитывая изложенное выше, были изготовлены круги твердостью С1 и СМ2 из монокорунда зернистостью № 12. Круги испытывались в условиях серийного производства на плоскошлифовальном станке 372Б. Испытания проводились при следующих режимах шлифования: скорость круга 30 м/с, подача на двойной ход при врезании: при черновой обработке 0,02 мм/дв. ход стола; при чистовой обработке 0,01 мм/дв. ход стола; скорость движения стола 10 м/мин; скорость круга при профилировании 40 м/мин; подача на глубину при профилировании круга 0,04—0,05 мм.

Шлифование лопаток осуществлялось всухую и с охлаждением. Для охлаждения применяли смазочно-охлаждающую жидкость следующего состава: 0,4% буры; 0,2% кальцинированной соды; 0,2% жидкого стекла; 0,1% смачивателя ОП-10; 0,2% трилона Б; остальное вода.

За критерий оценки качества обработки елочного профиля замка принимали величину, знак и глубину распространения остаточных напряжений в поверхностных слоях, шероховатость поверхности и ресурс работы деталей. Шлифующую способность кругов предварительно оценивали в лабораторных условиях при работе на плоскошлифовальном станке, оснащенном динамометром. Силы и съем металла измеряли в период затупления кругов. Машинное время затупления шлифовальных кругов принимали равным машинному времени обработки пяти-шести лопаток.

Кромкостойкость шлифовальных кругов оценивали количеством годных деталей, прошлифованных за период их работы между правкой профиля. За основной критерий кромкостойкости шлифовальных кругов, а следовательно, и точности обработки елочного профиля принимали радиус *R* дна канавки, измеренный на каждой детали с помощью микроскопа «Карл Цейсс». Дополнительно профиль контролировали на параллельность боковых граней зуба.

Остаточные напряжения измеряли с помощью прибора ПИОН-2 на пластинах толщиной 3 мм, вырезанных из полочки замка на электроискровой установке. Напряжения определяли на первой, третьей, шестой и восьмой лопатках в технологическом порядке их шлифования после правки круга, т. е. на деталях, прошлифованных острым кругом и в процессе его затупления.

Шероховатость поверхности оценивали с помощью прибора КВ-7 и по эталонам. Трещины на шлифованной поверхности выявляли методом цветной и люминисцентной дефектоскопии, применяемыми на предприятии.

Значения вертикальной составляющей силы шлифования P_y и отношение силы P_y к съему металла q через 9 мин, т. е. в период, когда круги достаточно притуплены, приведены на рис. 38. Отношение P_y/q характеризует затраты энергии при съеме единицы припуска металла; этот показатель позволяет судить о воздействии сил на поверхностные слои металла при различных вариантах обработки. При шлифовании наиболее твердым кругом опытного изготовления (с глубиной лунки 4 мм) величина силы P_y и отношение P_y/q меньше на 20—25% по сравнению с наиболее твердым кругом (с глубиной лунки 3,9 мм), применяемым на производстве, и на 17% меньше силы P_y и отношения P_y/q, чем при шлифовании наиболее мягким кругом (с глубиной лунки 4,4 мм). В случае шлифования кругом опытного изготовления с глубиной лунки 5 мм отношение P_y/q на 30% меньше, чем при шлифовании более твердым кругом серийного изготовления, и на 20% меньше, чем при шлифовании наиболее мягким кругом серийного изготовления. Таким образом, при шлифовании кругами опытного изготовления величина силы P_y на 17—30% меньше силы, чем при шлифовании кругами серийного изготовления.

Результаты испытания кругов опытного и серийного изготовления на кромкостойкость приведены на рис. 39. Кругами серийного изготовления можно прошлифовать только четыре детали с радиусом *R* профиля дна канавки в пределах допуска, в то время как кругами опытного изготовления — восемь деталей и более. При

шлифовании наиболее твердым кругом опытного изготовления (с глубиной лунки 4 мм) радиус дна канавки при обработке восьмой детали равен 0,545 мм, при шлифовании более мягким кругом (с глубиной лунки 4,57) радиус равен 0,55 мм и при шлифовании кругом с глубиной лунки 4,97 мм радиус дна канавки равен

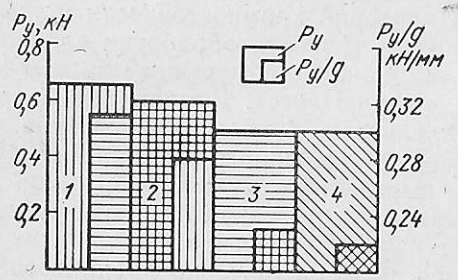


Рис. 38. Вертикальная составляющая силы P_y и отношение силы к съему металла P_y/q в зависимости от характеристики шлифовальных кругов:

1 — 25А 16 С2 7К; *2* — 25А 16 С1 7К; *3* — 45А 12 С2 9К; *4* — 45А 12 СМ2 9К

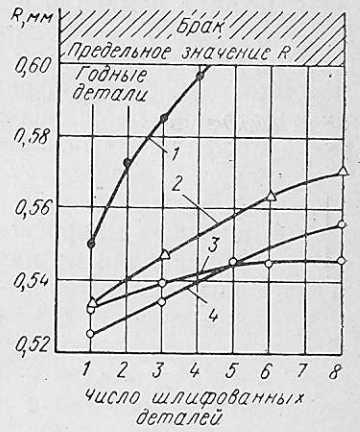


Рис. 39. Изменение радиуса дна канавки елочного профиля замка лопатки в зависимости от характеристики шлифовальных кругов:

1 — 25А 16 С2 КК (3,9 мм); *2* — 45А 12 СМ2 9К (5 мм); *3* — 45А 12 С1 9К (4 мм); *4* — 45А 12 СМ2 9К (4,57 мм)

0,57 мм. Таким образом, при шлифовании кругами из монокорунда восьми деталей радиус дна канавки последней детали на 0,3—0,5 мм меньше допустимого значения радиуса, определенного техническими условиями, в то время как при шлифовании кругами, применяемыми на производстве, радиус дна канавки имеет предельное значение уже при обработке четвертой детали.

В результате анализа остаточных напряжений в поверхносных слоях шлифованных деталей установлен сложный характер их распределения в глубь от шлифованной поверхности (рис. 40). На глубине h_1 от поверхности сформированы сжимающие остаточные напряжения σ_1, которые на глубине h_2 переходят в растягивающие. Растягивающие напряжения возрастают до максимума

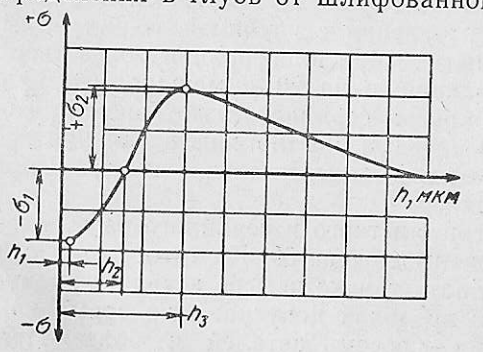


Рис. 40. Изменение остаточных напряжений в поверхностных слоях елочного профиля замка лопаток после шлифования

σ_2 на глубине h_3, после чего наблюдается уменьшение напряжений до 0. Растягивающие остаточные напряжения действуют под поверхностью, поэтому возникновение трещины следует ожидать на некоторой глубине от поверхности. В процессе образования трещины растягивающие напряжения должны преодолевать действие сжимающих напряжений и разрушить слой сжатого у поверхности металла. Чем больше толщина слоев со сжимающими напряжениями и больше величина этих напряжений, тем меньше опасность образования трещины. В случае незначительной толщины слоев со сжимающими напряжениями у поверхности действие растягивающих напряжений даже меньших по величине создает опасность возникновения трещин.

При шлифовании елочного профиля турбинных лопаток в поверхностных слоях возникают сжимающие остаточные напряжения в отличие от плоского шлифования пластин размером 70×7×3 мм, в поверхностных слоях которых возникают растягивающие напряжения, что обусловлено различным тепловым воздействием на поверхностные слои пластин и лопаток (лопатки имеют большую массу, а следовательно, и более интенсивный теплоотвод из зоны шлифования). При различных массе и форме шлифуемых деталей по-разному происходит релаксация напряжений в поверхностных слоях, что также будет влиять на их знак и характер распределения. Результаты, изложенные выше и в данном случае, подтверждают высказанные положения о степени влияния теплоты и деформационного упрочения, действующих при шлифовании.

В зависимости от различных условий обработки замков турбинных лопаток основные показатели остаточных напряжений h_1, σ_1, σ_2, h_3 могут изменяться. Показатели, характеризующие остаточные напряжения и их распространение в поверхностных слоях деталей, шлифованных кругами серийного изготовления и кругами из монокорунда с охлаждением и без охлаждения, приведены в табл. 10.

При шлифовании с охлаждением на некоторых деталях наблюдается уменьшение величины сжимающих напряжений до 30 Мн/м² (3 кгс/мм²) и глубины их распространения до 0,003 мм. В процессе затупления шлифовальных кругов остаточные напряжения изменяются незначительно. При длительном шлифовании наблюдается периодическое уменьшение глубины распространения остаточных сжимающих напряжений и последующее ее увеличение. Например, на деталях, прошлифованных седьмыми в технологической последовательности обработки, наблюдается, как правило, уменьшение толщины слоев со сжимающими напряжениями. При шлифовании последующих деталей толщина слоев увеличивается и становится приблизительно такой же, как при шлифовании предыдущих шести деталей. По-видимому, на изменение остаточных напряжений влияет периодическое затупление и обновление режущей поверхности шлифовальных кругов.

В процессе испытаний шлифованных деталей на долговечность контролировалось их состояние, для чего испытуемый узел подвергался периодическим разборкам. Были выявлены трещины на по-

Таблица 10

Остаточные напряжения и глубина их распространения в деталях

Характеристика круга	Охлаждение	№ деталей в последовательности их обработки	σ^2, МН/м², на глубине 0,002 мм	h_2, мм	σ_2, Мн/м²	h^3, мм
25А 16 С2 7К (серийный)	Без охлаждения	2 3	78,5 68,6	0,015 0,005	280 150	0,060 —
45А, 12 С2 К9К, глубина лунки 4 мм	Без охлаждения	1 3 5 7 8	58,8 157 147 235 137	0,01 0,03 0,03 0,06 0,04	250 260 70 260 210	0,070 0,060 0,040 0,070 0,140
45А 12 С2 9К, глубина лунки 4 мм	С охлаждением	2 5 8	68,6 29,4 78,4	0,0 0,003 0,025	300 160 110	0,050 0,070 0,040
45А 12 С1 9К, глубина лунки 5 мм	Без охлаждения	1 6	137,2 78,4	0,040 0,035	70 100	0,08—0,1 0,05—0,07

лочке замковой части трех лопаток. Эти детали были прошлифованы кругом 45А 12 С2 9К, из них две с охлаждением и одна всухую. Все три детали были прошлифованы седьмыми в технологической последовательности обработки. При исследовании характера трещинообразования выявлено, что на детали, прошлифованной всухую, трещина носит единичный точечный характер, а при шлифовании с охлаждением — групповой характер. Трещины на деталях, прошлифованных с охлаждением, имеют длину до 1 мм и залегают на глубине 0,15—0,3 мм. Они направлены перпендикулярно направлению шлифования.

Дальнейшие испытания узла продолжались с лопатками, прошлифованными всухую по шесть штук между профилированием круга. В результате комплексных исследований внедрена эффективная технология шлифования елочного профиля замка лопатки кругами характеристики 45А 21С1 СМ2 9К на связке 51б. При шлифовании этими кругами достигнуто повышение кромкостойкости в 2 раза. Детали, прошлифованные кругами 45А 12 С1 9К, проработали ресурс, увеличенный на 25% по сравнению с существующим.

Круги из монокорунда характеристики 45А 12 СМ2—С1 9К оказываются также высокоэффективными при профильном шлифовании замков крупногабаритных лопаток из сплава ХН65ВМТЮ. Получение профиля заданной точности на этих операциях затруднено вследствие съема припусков 8—10 мм в условиях врезного шлифования. Поэтому вследствие затупления шлифовальных кругов при съеме больших припусков происходит резкое ухудшение качества обработанной поверхности. Важным условием шлифования без прижогов деталей из сплава ХН65ВТЮ кругами из монокорунда является выбор соответствующей СОЖ. Наилучшие результаты получены при использовании в качестве СОЖ жидкости «Волжская-100». Эта жидкость содержит 96% индустриального масла и 4% присадки «Хлорэф-40». При шлифовании с эмульсией круги быстро засаливаются, вследствие чего на шлифованной поверхности возникают прижоги. Сульфофрезол и СОЖ на масляной основе марки МР-2 также уступают жидкости «Волжская-100». Сульфофрезол вязок и не обеспечивает необходимого охлаждения деталей, вследствие чего происходит ее нагрев. Жидкость МР-2 обладает большей жидкотекучестью, чем сульфофрезол, но в процессе шлифования частично выгорает и выделяет дым.

Оптимальными режимами шлифования профиля замка лопаток кругами из монокорунда с жидкостью «Волжская-100» являются: при черновом шлифовании — скорость круга 35 м/с, скорость продольного перемещения стола 20 м/мин, глубина шлифования 0,03 мм/дв.ход стола; при чистовом шлифовании — скорость круга 35 м/с, скорость перемещения стола 25 м/мин, глубина шлифования 0,02 мм/дв.ход.

Для улучшения качества шлифованной поверхности и повышения точности обработки деталей из сплава ЖС6К были апробированы и внедрены в производство шлифовальные круги из монокорунда оптимальной характеристики с подбором СОЖ и метода ее подвода в зону шлифования. Оптимальная твердость кругов СМ1. Круги твердости М3 и СМ2 показали худшие результаты, так как круги твердости М3 сильно изнашиваются из-за недостаточного удержания зерна связкой, а круги СМ2 из-за высокой твердости быстро засаливаются, вызывая вибрации и трещины на шлифованной поверхности. Удельная производительность кругов на бакелитовой связке твердостью СМ1, С1, СТ1 в 1,6, а иногда в 3,3 раза ниже, чем кругов на керамической связке.

При шлифовании деталей из жаропрочных сплавов кругами различных характеристик с применением в качестве СОЖ эмульсии не обеспечивается качество поверхности, требуемое по технологии, из-за шлифовочных трещин. Сульфохлорированное масло оказывается эффективным средством борьбы с трещинами. Кроме того, удельная производительность кругов на керамической связке в 1,5 раза, а для кругов на бакелитовой связке в 2,1 раза выше при охлаждении сульфохлорированным маслом по сравнению с охлаждением эмульсией.

На эффективность процесса шлифования влияет метод подвода СОЖ к зоне резания. Были опробованы способы одностороннего и двустороннего подвода жидкости. В конструкциях плоскошлифовальных станков предусмотрен односторонний подвод жидкости. С помощью насоса по трубопроводу через сопло жидкость подается

на деталь и круг в направлении вектора скорости круга. При возвратно-поступательном движении стола в случае шлифования против подачи жидкость попадает на нагретую деталь, перемещающуюся из-под режущей кромки круга в сторону сопла. При шлифовании по подаче деталь оказывается отделенной от сопла круга, поэтому на деталь жидкости попадает меньше. Для улучшения условий охлаждения путем увеличения количества СОЖ были установлены дополнительно трубопровод и сопло, подающие жидкость в направлении, противоположном вектору скорости круга.

Способ подвода эмульсии не влияет на показатели процесса шлифования. В то же время при различных способах подвода в зону шлифования сульфохлорированного масла получаются различные показатели процесса шлифования. Замена одностороннего полива двусторонним приводит к уменьшению износа круга, увеличению удельной производительности более чем в 1,5 раза.

Охлаждающее действие жидкости (эмульсии) реализуется полностью даже при одностороннем подводе жидкости, так как увеличение ее количества за счет двустороннего подвода не влияет на показатели процесса шлифования. Увеличение удельного съема металла в 1,5 раза и уменьшение износа кругов при возрастании количества сульфохлорированного масла свидетельствуют об эффективном влиянии химически активных добавок в жидкость. Увеличение количества добавок за счет двустороннего полива способствует уменьшению налипания металла на абразив и, как следствие, уменьшению износа.

При двустороннем подводе жидкости в зону шлифования удельная производительность в случае использования сульфохлорированного масла в 3 раза выше, чем при использовании эмульсии.

Изменение скорости круга при шлифовании с различными средами по-разному влияет на износ и удельную производительность. В присутствии сульфохлорированного масла увеличение скорости от 13 до 30 м/с вызывает уменьшение удельной производительности от 4,8 до 3,5 раза, а при шлифовании с эмульсией — до 1,4 раза. Увеличение скорости круга при двустороннем подводе сульфохлорированного масла обеспечивает качественное шлифование без трещин при скоростях до 30 м/с .Увеличение скорости до 37 м/с вызывает трещины. Таким образом, можно рекомендовать следующие оптимальные технологические условия плоского врезного шлифования деталей из сплава ЖС6К: круг 45А 25М3 8К СОЖ — сульфохлорированное масло (96% веретенное 2 и 4% хлореф-40); метод подвода СОЖ — двусторонний полив; режимы: скорость круга не более 30 м/с, продольная скорость стола 12—15 м/мин, глубина шлифования 0,01 — и 0,02 мм/дв.ход при черновом шлифовании и 0,005 мм/дв.ход при чистовом шлифовании. Снимаемый припуск 0,4 мм при черновом шлифовании и 0,1 мм при чистовом шлифовании. Применение этих технологических вариантов в производстве обеспечивает качество шлифованной поверхности, требуемое по технологии, при обеспечении значений удельного съема металла 5,0.

Эффективность шлифования деталей из жаропрочных сплавов типа ЖС повышается при использовании кругов из эльбора. Внедрение кругов из эльбора позволяет повысить удельную производительность приблизительно в 3—5 раз по сравнению с кругами из монокорунда при одновременном улучшении качества шлифованной поверхности.

Результаты апробирования и внедрения кругов из эльбора, режимов шлифования и СОЖ на операциях обработки деталей из титановых сплавов приведены в табл. 11. Повышение скорости детали до 27 м/мин при скорости круга 22 м/с вызывает увеличение износа круга, а уменьшение скорости круга до 25 м/с при различных скоростях детали приводит к возникновению прижогов.

Таблица 11

Режимы шлифования деталей из титановых сплавов кругами из эльбора с получением шероховатости 7-го класса

Шлифование стаканов из сплава ВТЗ-1	Характеристика круга	Припуск снимания без дефектов	Режимы шлифования		СОЖ
			$v_к$, м/с	$v_д$, м/мин	
Внутреннее врезное, ∅ 78 мм, $L = 15$ мм	ЛПП50×32×20×5 ЛО 16 СТ1—СМ2 7К	0,15—0,2	22	20	Эмульсия
	ПП50×40—32×20, 63С 16—25 СМ1 6К	0,5			
Наружное круглое	ЛПП400×25×203	1,2	24	8	Эмульсия
	ЛО 12 С2 7К	4			4%-ный водный раствор K_3PO_4
	ПП400×25×203 63С 25 М3—СМ1 К	0,15—0,2			Эмульсия
Торца	ЛПП400×25×203	0,04	24	8	Эмульсия
		0,3—0,4			4%-ный водный раствор K_3PO_4

На операциях круглого наружного шлифования стаканов из сплава ВТЗ-1 стойкость кругов (припуск, снимаемый без прижогов) в 6—8 раз выше стойкости кругов из карбида кремния в случае применения эмульсии.

Если в качестве СОЖ применяется 4%-ный водный раствор трикалийфосфата, то стойкость кругов из эльбора повышается по сравнению с кругами из карбидкремния в 20 раз. При шлифовании торцов стаканов стойкость кругов из эльбора в 6—8 раз выше при высоком качестве поверхности шлифованных деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс шлифования деталей из жаропрочных сплавов на хромоникелевой и титановой основах характеризуется сложными физико-химико-механическими изменениями, происходящими в тончайших поверхностных слоях сплавов под влиянием высоких мгновенно действующих температур и давлений. Эти изменения отрицательно влияют на качество, надежность и долговечность изделий.

Комплексные методы исследований позволяют контролировать структурные, микрохимические и механические изменения, локализованные в тончайших поверхностных слоях металла, и назначать оптимальные варианты обработки.

Наиболее доступными факторами, с помощью которых можно контролировать и регулировать качество поверхности деталей непосредственно в процессе их изготовления, являются силы резания, влияющие на температуру и качество шлифованной поверхности.

Для высококачественного шлифования деталей из жаропрочных сплавов, в том числе на хромоникелевой основе типа ЖС6К, рекомендуются круги из монокорунда и эльбора, являющиеся наиболее прочными абразивными материалами и в меньшей степени, чем корундовые материалы, склонные к физико-химическому взаимодействию со сплавами.

Рекомендуется применять круги с реакционноспособными связками, которые обеспечивают более прочное закрепление зерна в круге при меньшем количестве по сравнению с обычными связками и повышают кромкостойкость кругов при одновременном уменьшении сил резания и улучшении качества шлифованной поверхности. Для повышения качества поверхности необходимо применять круги 8-й и 9-й структуры, обеспечивающие равномерное самозатачивание инструмента и уменьшение сил резания. Как показывает опыт внедрения кругов на заводах, эти рекомендации могут быть в наибольшей степени эффективны на операциях шлифования сложных профилей, являющихся наиболее трудоемкими. Применение кругов характеристики М12 СМ2—С1 9К на связке 51б при шлифовании елочного профиля замка лопаток повышает кромкостойкость

в 2 раза при одновременном улучшении качества шлифованной поверхности и повышении ресурса деталей. Для шлифования деталей из жаропрочных сплавов рекомендуется в качестве СОЖ жидкость «Волжская-100» на основе масла с присадкой «Хлорэф-40».

Применение кругов из эльбора для плоского шлифования деталей из жаропрочных сплавов способствует резкому повышению качества поверхности при одновременном увеличении удельного съема металла 20—25, т. е. в 4—5 раз и более, по сравнению с монокорундовыми кругами.

При шлифовании деталей из труднообрабатываемых инструментальных сталей кругами из монокорунда обеспечивается увеличение времени шлифования без прижогов и удельной производительности в 1,5 раза и более по сравнению с другими корундовыми абразивными материалами. Удельная производительность кругов из эльбора увеличивается в 50—100 раз, а время шлифования без прижогов без правки круга до полного износа также возрастает.

Для шлифования деталей из химически активных сплавов на основе титана рекомендуются круги из эльбора, алмаза и карбида кремния, являющиеся наиболее прочными и инертными абразивными материалами по сравнению с корундами различных видов. Стойкость кругов из эльбора на керамической связке (по времени шлифования без прижогов) в 10—15 раз и более выше, чем стойкость оптимальных кругов из карбида кремния на пульвербакелитовой связке, а удельная производительность равна 50.

Прямая зависимость износостойкости абразивов с их прочностью и микрохрупкостью, а также качеством шлифованной поверхности позволяет обоснованно выбирать абразивы с заданными свойствами для шлифования деталей из титановых сплавов.

В результате создания кругов из эльбора появилась возможность осуществлять высококачественное шлифование деталей из труднообрабатываемых жаропрочных и инструментальных сплавов и сталей, с достижением показателей обрабатываемости конструкционных сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богомолов Н. И.** О работе трения в абразивных процессах. Труды ВНИИАШ, № 1, М., «Машиностроение», 1965, с. 72—79.

2. **Богомолов Н. И., Саютин Г. И., Егоров Н. И.** Повышение эффективности профильного шлифования деталей из жаропрочных сплавов. — В кн.: Абразивы и алмазы. М., НИИМАШ, 1965, с. 7—9.

3. **Богомолов Н. И., Новикова Л. Н.** Исследование трения и износа кристаллов карбида кремния и электрокорунда в зависимости от ориентировки их кристаллографических плоскостей. Теория трения и износа. М., «Наука», 1965, с. 148—151.

4. **Богомолов Н. И.** Исследование прочности абразивных зерен в процессе микрорезания. — «Заводская лаборатория», 1966, № 3, с. 353—354.

5. **Выбор** шлифовальных кругов при обработке титановых сплавов. — «Вестник машиностроения», 1972, № 5, с. 65—67. Авт.: Саютин Г. И., Богомолов Н. И., Тикеджи Б. А. и др.

6. **Колев К. С.** Вопросы точности при резании металлов. М., Машгиз, 1961, 134 с.

7. **Круги** для шлифования титановых сплавов. — «Станки и инструмент», 1970, № 5, с. 15. Авт.: Саютин Г. И., Смирнов В. А., Григорьева К. Т. и др.

8. **Кучерявый О. И.** Исследование процессов шлифования стали в связи с природой явлений и свойствами шлифуемых поверхностей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Киев, 1964, 18 с.

9. **Кудасов Г. Ф., Карташев А. М.** Некоторые вопросы применения шлифовальных кругов из монокорунда. — «Вестник машиностроения», 1964, № 12, с. 50—52.

10. **Лысанов В. С., и Шпотаковский Д. Ф.** Области эффективного применения шлифовальных кругов из эльбора. — «Станки и инструмент», 1972, № 6, с. 5—6.

11. **Маслов Е. Н.** Теория шлифования материалов. М. «Машиностроение», 1974, 316 с.

12. **Маталин А. А.** Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М., Машгиз, 1956, 252 с.

13. **Методика** и установка для определения износостойкости абразивных зерен. — «Абразивы», 1972, № 4, с. 14—17. Авт.: Харченко И. В., Саютин Г. И., Богомолов Н. И.

14. **Наерман М. С., Пекарев Л. Е.** Шлифование быстрорежущих сталей кругами из эльбора. — «Станки и инструмент», 1972, № 6, с. 8—10.

15. **Окамура К., Накадзима Т.** О механизме резания абразивным зерном.— «Сейлищу Кикой», 1970. Т. 36, № 5, с. 399—346. Пер. 72/64914. ВИНИТИ, пер. № 91382/1, 25 с.

16. **Похоровский А. Д., Качнов Ю. И.** Применение эльбора для шлифования резьбы ходовых винтов. — «Станки и инструмент», 1972, № 6, с. 6—8.

17. **Рахмарова М. С., Мирер Я. Г.** Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин. М., «Машиностроение», 1966, 150 с.

18. **Резников А. Н.** Алмазные режущие инструменты. Куйбышевское книжное издательство, 1965, 130 с.

19. **Саютин Г. И., Сновидов В. М., Богомолов Н. И.** Исследование физико-химических процессов, происходящих в поверхности шлифования деталей из титановых сплавов. ФХМ, 1971, № 5, с. 22—24.

20. **Силин С. С.** Исследование тепловых процессов при круглом наружном шлифовании. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., 1956, 21 с.

21. **Субмикрорельеф** шлифованной поверхности. — «Станки и инструмент», 1969, № 7, с. 37—38. Авт.: Богомолов Н. И., Саютин Г. И., Тикеджи Б. А. и др.

22. **Татаренко В. В., Сало Г. Д., Борисов Б. Я.** Микротермопары для исследования температурных полей в зоне шлифования. — Вестник машиностроения», 1969, № 1, с. 50—52.

23. **Фрашэр Р. Х.** Боразон (к. н. б.) — сверхабразив для шлифования стали. — «Труды Международной конференции по шлифовальной технике», Марибор (Югославия), октябрь 1973, с. 73—78.

24. **Химушин Ф. Ф.** Легирование, термическая обработка и свойства жаропрочных сталей и сплавов. М., Оборонгиз, 1962, 335 с.

25. **Хрульков В. А.** Шлифование жаропрочных сплавов. М., «Машиностроение», 1964, 191 с.

26. **Шпотаковский Д. Ф.** Рекомендации по шлифованию инструментом из эльбора деталей сложного профиля (Тезисы докладов на международном семинаре по применению инструмента из эльбора). Л., 1973, с. 90—111.

27. **Grinding** high strength thermal resistant materials. — „Grind. and Finish", 1961, 7, № 9, с. 44—46.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Качество поверхности изделий из жаропрочных сплавов в зависимости от затупления шлифовальных кругов и режимов шлифования . . . 4
Особенности процесса затупления кругов при шлифовании деталей из жаропрочных сплавов 4
Силы резания в процессе затупления шлифовальных кругов . . 6
Механизм затупления и разрушения единичных абразивных зерен при микрорезании 10
Разработка и выбор критериев качества шлифованной поверхности для контроля эксплуатационных свойств кругов 12
Влияние характеристики кругов на силы резания и качество шлифованной поверхности 32
Взаимосвязь основных критериев качества поверхностных слоев с силами резания и температурой шлифования 32
Пути улучшения качества шлифованной поверхности 33
Эффективность применения кругов оптимальных характеристик . . . 48
Точность обработки, стойкость кругов и время шлифования без прижогов инструментальных сталей 48
Качество шлифованной поверхности и долговечность турбинных лопаток из жаропрочных сплавов. 51
Заключение 60
Список литературы 62

Геннадий Иванович Саютин

ВЫБОР ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

(для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей)

Редактор издательства **И. И. Лесниченко**
Технический редактор **А. И. Захарова**
Корректор **Н. И. Шарунина**
Переплет художника **А. Я. Штаркмана**

Сдано в набор 4/XI 1975 г. Подписано в печать 4/I 1976 г. Т-00503. Формат 60×90 1/16. Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 4,0 Уч.-изд. л. 4,3 Тираж 11 000 экз. Заказ 1656. Цена 22 коп.

Издательство «Машиностроение» 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, К-51, Цветной бульвар, д. 26.