

УДК 621.923-5

**В.Г. Лебедев, Н.М. Клименко, Е.А. Луговська, А.В. Овчаренко**  
*Одеський національний політехнічний університет*

**КОНТАКТНІ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ПРИ ШЛІФУВАННЯ КРУГАМИ З КНБ ШИЙОК ВАЛУ ГАЗОВОЇ ТУРБІНИ, НАПЛАВЛЕНИХ МАРТЕНСИТНО – СТАРІЮЧОЮ СТАЛЛЮ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ НАПЛАВЛЕННОГО ШАРУ**

*У статті наведено результати досліджень температур поверхні при шліфуванні. Кругами з КНБ шийок цільнокованого вала газової турбіни, що наплавлені мартенситно – старіючою сталлю H18K9M5T. Показана залежність температур від режимів шліфування і від характеристик кругів. Розглянуті ризики часткової втрати міцності через структурні і фазові зміни в поверхневому шарі, які викликаються температурами шліфування. Дослідження направлені на створення нормативної бази шліфування мартенситно – старіючих сталей.*

*Ключові слова:* КНБ, мартенситно – старіюча сталь, залежність температур, структурні і фазові зміни.

**В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, Е.А. Луговская, А.В. Овчаренко**  
*Одесский национальный политехнический университет*

**КОНТАКТНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ КНБ ШЕЕК ВАЛА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ, НАПЛАВЛЕННЫХ МАРТЕНСИТНО - СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ**

*В статье приведены результаты исследований температур поверхности при шлифовке. Кругами из КНБ шеек цильнокованого вала газовой турбины, наплавленные мартенситно – стареющей сталью H18K9M5T. Показана зависимость температур от режимов шлифования и от характеристик кругов. Рассмотрены риски частичной потери прочности через структурные и фазовые изменения в поверхностном слое, вызываемые температурами шлифовки. Исследования направлены на создание нормативной базы шлифовки мартенситно – стареющих сталей.*

*Ключевые слова:* КНБ, мартенситно – стареющая сталь, зависимость температур, структурные и фазовые изменения.

**V.G. Lebedev, N.N. Klimenko, E.A. Lugovskaya, A.V. Ovcharenko**  
*Odessa National Polytechnic University*

**CONTACT TEMPERATURES OF SURFACE GRINDED WITH BORAZON WHEELS THE NECKS OF SHAFT OF OF ONE-PIECE SHAFT OF GAS TURBINE WELDED WITH MARTENSIT AGING STEELS AND THEIR INFLUENCE ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE DEPOSITED LAYER**

*The article presents the results of research in the grinding surface temperatures while grinding of one-piece shaft of gas turbine welded with martensit aging steel H18K9M5T with borazon wheel.*

*The dependence of the temperature of the grinding conditions and the characteristics of the wheels were shown. Risks considered partial loss of strength through structural and phase changes in the surface layer caused by grinding temperatures estimated. Research aimed at creating a regulatory framework of grinding of martensit - aging steel.*

*Keywords:* Borazon, martensit - aging steel, temperature dependence, structural and phase changes.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вал – основная и наиболее нагруженная деталь в газотурбинном двигателе (ГТД). На него действуют следующие силы: крутящий момент, соответствующий передаваемой турбиной мощности, изгибающий момент от собственного веса и веса насаженных на него деталей, силы неуравновешенного давления пара вдоль оси.

Значительный вес самого вала, высокая скорость вращения, большая передаваемая мощность и высокая температура эксплуатации вызывают значительный износ шеек вала, которые подлежат восстановлению наплавкой, поскольку восстановление работоспособности вала таким методом обходится в 10 раз дешевле, чем стоимость нового. После наплавки следует механическая обработка, которая завершается шлифованием поскольку необходимо обеспечить точность порядка  $h_6$  и шероховатость порядка Ra 25 – 16.

В настоящей работе наплавка осуществлялась сталью из разряда мартенситно- стареющих H18K9M5T.

Мартенситно-стареющие стали – это безуглеродистые сплавы на базе системы Fe – Ni, легированные дополнительно кобальтом, молибденом, титаном и другими элементами. Сплавы этого типа после воздушной закалки на мартенсит подвергают отпуску при 480 – 500 С. Отпуск приводит к сильному дисперсионному твердению вследствие выделения интерметаллидов из мартенсита, пересыщенного легирующими элементами.

Для практики особенно ценно, что частицы промежуточных интерметаллидов в мартенситностареющих сталях очень дисперсные. Это в значительной мере обусловлено выделением их на дислокациях.

Структура мартенситностареющих сталей характеризуется высокой плотностью дислокаций, появляющихся при мартенситной перестройке решетки. В речном (недвойникованном) мартенсите плотность дислокаций измеряется величиной порядка  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , т. е. такой же, как в сильно наклепанном металле. Этим субструктура мартенситно – стареющих сталей в закаленном состоянии резко отличается от субструктуры алюминиевых, медных и других сплавов, подвергаемых закалке без полиморфного превращения.

В мартенситностареющих сталях дислокационная структура, сформировавшаяся в процессе мартенситного превращения, очень устойчива во время последующего нагревания и практически не меняется при оптимальных температурах отпуска (480 – 500 °С). Сохранение высокой плотности дислокаций в течение отпуска может быть в значительной мере обусловлено закреплением дислокаций дисперсными выделениями. [1]

При повышении температуры отпуска (выше ~ 500 °С) может произойти обратное мартенситное превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$ , так как точка  $A_H$  близка к оптимальным температурам отпуска. Рис 1.

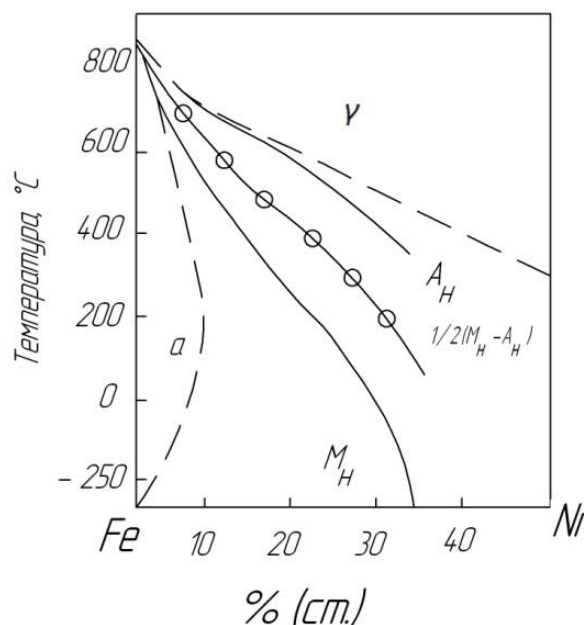


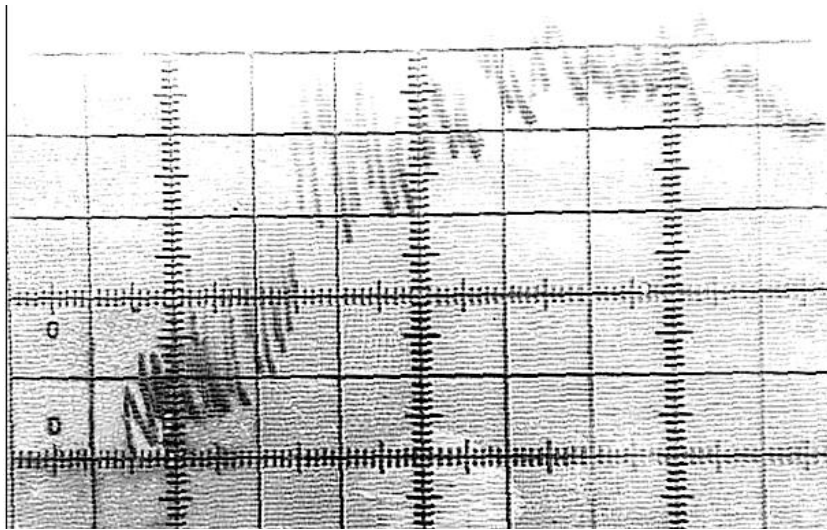
Рис.1. Зависимость температур начала мартенситного превращения при охлаждении ( $M_H$ ), обратного мартенситного превращения при нагревании ( $A_H$ ) и расчетной температуры равенства свободных энергий аустенита и мартенсита  $T_0 = \frac{1}{2}(M_H + A_H)$  от содержания никеля в системе Fe- Ni ( по данным Кауфмана и Коэна): пунктирная линия – границы  $\alpha$  и  $\gamma$  – областей на диаграмме стабильных равновесий.

Образование аустенита сопровождается растворением интерметаллидов, ранее выделившихся из  $\alpha$ -фазы. Кроме того при повышении температуры выше 500°С происходит интенсивная коагуляция выделившихся интерметаллидных соединений. Это обстоятельство приводит к разблокированию дислокаций и снижению прочности. Таким образом температура шлифования поверхности наплавленного поверхностного слоя не должна превышать величины 500°С для того чтобы не произошла разупрочнение поверхностного слоя. Для того, чтобы держать температуру в заданных пределах необходимо изучить закономерности изменения температуры шлифования этих сталей в зависимости от условий шлифования – характеристик кругов КНБ, режимов обработки и условий охлаждения.

**Постановка задач.** В работе поставлена цель - исследовать контактные температуры при шлифования наплавленного слоя из мартенситно – стареющей стали кругами из КНБ для того, чтобы получить возможность управлять тепловым процессом шлифования, обеспечивая стабильные высокопрочные свойства поверхностного слоя.

**Изложение основного материала.** Исследование температур шлифования проводилось по методики, изложенной в работах[2]. Результаты измерений температуры на стали Н18К9М5Т сопоставлялись с результатами, полученными на титановом сплаве ВТ8.

Достоинство указанной методики состоит в том, что она дает возможность оценить не только контактную температуру, но и температуру каждого режущего зерна. Рис.2.



**Рис.2. Характерный тепловой импульс, полученный при измерении контактной температуры шлифования.**

В результате проведенных исследований установлено, что теплообразование при шлифовании представляет собой импульсный процесс, протекающий в короткий промежуток времени.

Возникающие электрические сигналы термо – эдс, зафиксированные на осциллограмме, представляют собой тепловой процесс в зоне резания (рис.2). На этом рисунке нижняя огибающая представляет собой контактную температуру  $T_k$ , возникающую в зоне контакта круга с деталью. Импульсы, расположенные на ней, представляют собой мгновенную температуру  $T_m$ , развивающуюся в зоне микрорезания отдельным зерном. Поскольку, огибающая  $T_k$ , на которой находятся импульсы  $T_m$ , имеет значительную амплитуду, можно рассматривать еще и суммарную температуру поверхности в данной точке в определенный момент времени, называемую импульсной, равную  $T_i = T_k + T_m$ . [4.5]

Для определения закономерностей, которым подвержены эти виды температур, был проведен многофакторный эксперимент, в процессе которого регистрировались контактные, мгновенные и суммарные температуры шлифования. Ниже в основном рассматриваются закономерности касающиеся контактной температуры, поскольку последняя оказывает наибольшее влияние на шлифуемую поверхность.

а) Влияние характеристик кругов.

Контактная температура поверхности в значительной степени зависит от зернистости шлифовального круга (рис.3). Температура поверхности тем ниже, чем выше номер зернистости шлифовального круга. Это объясняется уменьшением количества зерен КНБ в пятне контакта круга со шлифуемой поверхностью. Величина же каждого импульса увеличивается незначительно, что и приводит к снижению температуры поверхности.

Твердость круга оказывает большое влияние на температуру поверхности – чем тверже круг, тем она выше. Это объясняется худшей самозатачиваемостью более твердых кругов и меньшей деформацией их связи, что приводит к более глубокому вдавливанию зерен в металл. В значительной степени температура зависит от теплофизических характеристик шлифуемой поверхности и шлифовального круга. Так, при сравнении температур шлифования материалов Н18К9М5Т и титанового сплава ВТ8 значениями коэффициента теплопроводности и тепловой активности которого ниже чем у стали Н18К9М5Т температура поверхности при одних и тех же условиях оказывается в 1,5 раза выше, чем при шлифовании вышеупомянутой стали. Это объясняется изменением характера теплораспределения между кругом и деталью, а также изменением закономерности распространения теплового поля в шлифуемом металле.

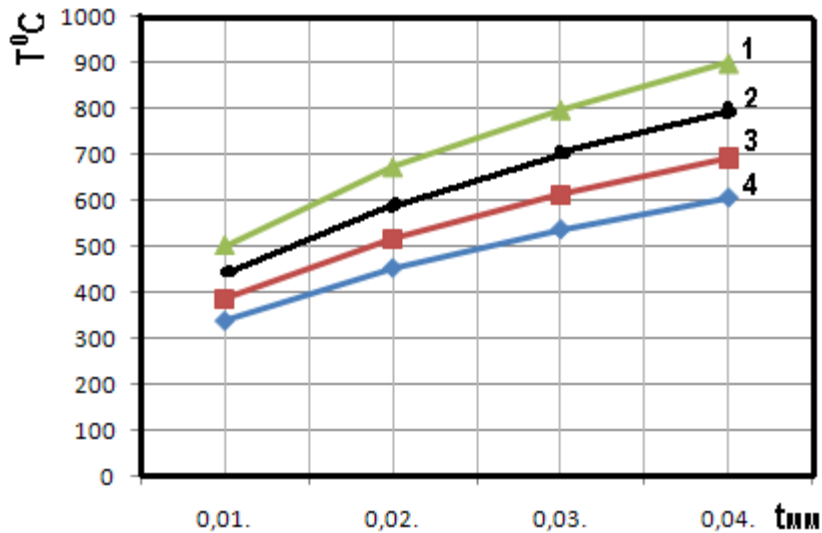


Рис. 3. Залежність температури поверхні  $T_k$  при шліфуванні від глибини різання, своїх властивостей оброблюваного матеріала та характеристик круга: 1 – сплав ВТ 8 (круг ЛО25С1К8-100 %), 2 – сплав ВТ 8 (круг ЛО12С1К8-100 %) 3 – сталь 08Х18Н9Т (круг ЛО25С1К8-100 %), 4 – сталь 08Х18Н9Т (круг ЛО12С1К8-100).

При збільшенні швидкості обертання шліфувального круга температура поверхні зростає, внаслідок чого збільшується кількість теплових імпульсів в одиницю часу, що діють на шліфувану поверхню.

При збільшенні продольної подачі спостерігається зростання температури поверхні в результаті того, що зростає величина теплового імпульсу від кожного зерна окремо, імпульси, сумуючись, забезпечують загальне підвищення температури.

При збільшенні глибини шліфування спостерігається значуще зростання температури, яке пояснюється як збільшенням кількості теплових імпульсів в зоні різання, так і збільшенням величини кожного імпульсу.

При збільшенні поперечної подачі температура поверхні також зростає, що пояснюється збільшенням плями контакту круга з заготовкою в поперечному напрямку.

Математична обробка отриманих даних дозволила знайти залежність контактної температури поверхні як функції режимів обробки, теплофізичних властивостей круга та деталі:

$$T_k = \frac{1,3 \cdot 10^8 t^{0,42} s^{0,12} v_{кр}^{0,47} (\lambda_d^{1,2} + \lambda_{кр}^2) k}{r^{0,21} \varepsilon (\lambda_d^2 + 370 \lambda_{кр}^2)}$$

де  $v_3$  – швидкість деталі відносно затриманого круга, м/с;

$t$  – глибина різання, мм;

$s$  – поперечна подача, мм/ход стола;

$v_{кр}$  – швидкість обертання шліфувального круга, м/с;

$r$  – радіус закруглення зерна, мкм;

$\varepsilon$  – коефіцієнт теплової активності деталі, Дж/(м<sup>2</sup>·град·с<sup>0,5</sup>);

$\lambda$  – коефіцієнти теплопровідності відповідно деталі та круга, Дж/(м·с·град);

$k$  – коефіцієнт, що залежить від виду зв'язки круга: для керамічної  $k = 1$ , для бакелітової  $k = 1,33$ .

Температурні залежності від режимів шліфування показані на рис.4.

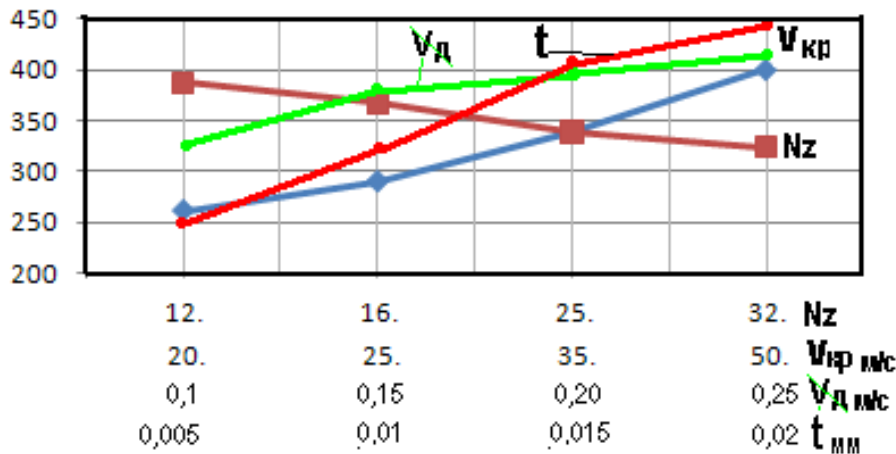


Рис. 4. Зависимость контактной температуры от факторов обработки  $v_{кр} = 35$  м/с,  $v_{з} = 0,10$  м/с,  $t = 0,01$  мм,  $s = 2,5$  мм/ход стола  $Nz = 25$ . Сталь 08X18H9T (круг ЛО25С1К8-100 %).

Как показало проведенное исследование, при шлифовании кругами из КНБ различных материалов контактные температуры поверхности могут достигать величин 500...700 °С и выше, в зависимости от условий шлифования.

Мгновенная температура, возникающая при резании отдельными зёрнами КНБ, является весьма сложным объектом исследования.

Трудность в проведении данного исследования заключается не только в сложности регистрации и измерения тепловых импульсов, возникающих при резании зёрнами, но и в том, что размер зерна в круге меняется в довольно широких пределах, что приводит к резким колебаниям размеров радиусов закруглений, а следовательно, и к изменению абсолютных значений температур резания.

Кроме того, если рассматривать тепловой процесс при резании зерном не с точки зрения изменения температуры при прохождении зерна по его трассе, а с точки зрения мгновенной температуры данной точки поверхности, то необходимо отметить, что различие зарегистрированных абсолютных значений температур будет весьма большое ввиду того, что рассматриваемая точка металла может захватываться различными участками трассы зерна, тепловыделение на которых существенно различно.

Указанное обстоятельство приводит к несоответствию закона распределения радиусов закругления абразивных зёрен в шлифовальном круге, измеренных профиллографическим методом, и закона распределения значений абсолютных величин температур резания зёрнами, воздействующими на данную точку поверхности металла.

Так, если закон распределения радиусов закругления зёрен принимается нормальным, что подтверждается экспериментальными измерениями, то исследования, проведенные в работе, показали, что закон распределения абсолютных значений температур соответствует закону равной вероятности с дисперсией  $\delta(T_z) = 224$  °С.

Изучение полученных значений показало, что мгновенная температура мало зависит от режимов обработки. В основном изменение теплового импульса зависит от характеристики круга и свойств обрабатываемого материала.

Температура, возникающая при резании зёрнами ниже, чем общая температура поверхности, осредненная по зоне резания. Однако, как видно на рис.5, отсчет величины амплитуды мгновенной температуры производится от уровня контактной температуры поверхности. Точка отсчета же температуры поверхности соответствует температурному уровню окружающей среды, поэтому в реальных условиях на данную точку поверхности металла воздействует импульсная температура, амплитуда которой равна сумме величин амплитуд  $T_k$  и  $T_m$ .

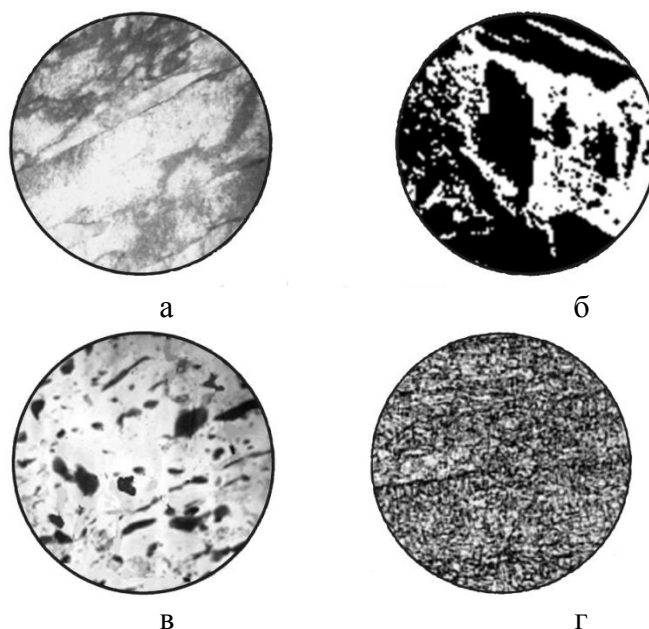
Частота действия импульсной температуры  $T_i$  будет соответствовать частоте следования импульсов от зёрен.

Исследования зависимости импульсной температуры от факторов обработки показали, что изменения импульсной температуры отличны от зависимостей изменения контактной температуры, и температуры от зёрен. Абсолютная величина  $T_i$  значительно больше контактной температуры.

На основании проведенных исследований процесс теплообразования в зоне резания может быть описан и объяснен следующим образом. При прохождении первого режущего зерна по данной точке поверхности за время 3...4 мкс возникает тепловой импульс. После прекращения контакта зерна с данной точкой поверхности начинается процесс охлаждения, который на 65...75 % заканчивается за то же время. После этого кривая охлаждения имеет значительно более пологий характер и точка поверхности, не успев охладиться до начальной температуры окружающей среды, подвергается воздействию последующего зерна. Величина теплового импульса от второго зерна будет в значительной степени зависеть от остаточной температуры данной точки, поскольку второе зерно входит в нагретый металл, предел прочности которого уже изменен. По окончании действия второго зерна вновь начинается процесс охлаждения, скорость которого будет уже меньше, так как в первом случае разность температур была  $T_{m1} - T_0$ , а во втором случае  $T_{m2} - T_{m_{ост}}$  (остаточная). Этот ступенчатый процесс будет идти до момента теплового насыщения, которое происходит через 4...5 мс и выражается в том, что остаточная температура от зерен достигает величины, когда выравниваются скорости охлаждения при воздействии на зерен и когда прочность шлифуемого металла практически уже не меняется, а остается на уровне соответствующем установившейся температуре поверхности  $T_k$ . Характер тепловых импульсов от режущих зерен при этом соответствует Рис. 2.

Как видно из рис.2, импульсная температура примерно на 30 – 35 % выше чем температура контактная. Таким образом, предельные значения импульсной температуры могут быть больше  $500 - 550^{\circ}\text{C}$  в то время когда значения контактной температуры ниже этой величины. Можно ожидать в этом случае, что произойдет местное растворение интерметаллидных фаз или же их коагуляция. Однако в процессе экспериментов металлографические исследования этого не выявили. Объяснить этот факт можно тем, что длительность воздействия на металл импульсной температуры на 3 порядка ниже, чем длительность воздействия контактной температуры. В первом случае это микросекундный диапазон, а во втором случае миллисекундный. Вероятно, что за столь короткий промежуток времени растворение интерметаллидов или их коагуляция произойти не успевают.

Ниже показаны структуры стали 08X18H9T после литья, закалки, старения и после шлифования при контактной температуре порядка  $600^{\circ}\text{C}$ .



**Рис.5. Структуры стали 08X18H9T. а) после литья, б) закалки (от  $850^{\circ}\text{C}$ ), в) старения  $450^{\circ}\text{C}$ , г) после шлифования при контактной температуре порядка  $600^{\circ}\text{C}$ . Увеличение а,б,в -  $\times 250$ ; г -  $\times 150$ .**

Как видно из фотографий микрошлифов: а – аустенитная структура литой мартенситно – стареющей стали, б – после закалки - структура безуглеродистого мартенсита и остаточного аустенита, в – мартенситно аустенитная структуры с интерметаллидными упрочняющими фазами,

г – структура после шлифования при температуре выше  $600^{\circ}\text{C}$  – мартенситно – аустенитная структура сохранилась однако упрочняющих интерметаллидных фаз не наблюдается. Можно предположить, что фактор растворения интерметаллидов в твердом растворе преобладает над фактором их коагуляции при повышении температуры выше  $500^{\circ}\text{C}$ .

#### **ВЫВОДЫ:**

1. Процесс теплообразования при шлифовании кругами из КНБ является дискретным процессом, при котором формируются три вида температур: контактная  $T_k$ , мгновенная  $T_m$  и импульсная  $T_i$ , время действия которых составляет соответственно 1...5 мс, 1...2 мкс, 1...2 мкс. Импульсная температура всегда больше контактной в 1,5 ... 2 раза, что необходимо учитывать при настройке технологического оборудования. Проведенное исследование дало возможность установить, что контактные температуры могут достигать  $900...1000^{\circ}\text{C}$ .

2. Наибольшее влияние на температуры оказывает глубина шлифования, остальные факторы – скорость детали, скорость вращения шлифовального круга и поперечная подача оказывают несколько меньшее влияние. При врезании шлифовального круга мгновенная температура возрастает от нулевого уровня и находится в пределах  $250^{\circ}\text{C}$ . По мере шлифования, тепловой процесс в зоне резания стабилизируется на некотором уровне, соответствующем контактной температуре поверхности, и рост мгновенной температуры происходит от этого уровня. Величина импульсной температуры может достигать  $1300...1400^{\circ}\text{C}$ . В общем температурно – силовые нагрузки, сопутствующие процессу обработки, на 20...30% ниже, чем при абразивном шлифовании.

#### **Список использованных источников:**

1. Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева. Материаловедение, Москва, Машиностроение, 1990.
2. Чумаченко Т.В. Технологическое обеспечение качества и производительности обработки поверхностей шеек валов роторов газовых турбин, напыленных минералокерамикой. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Одесса 2011.
3. Аль Аджейлат С.А. Шероховатость поверхности деталей при эльборовом шлифовании направляющих прессов / С.А. Аль Аджейлат, В.Г. Лебедев // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсе и энергосбережении : мат. междунар. науч. – техн. конф., тезисы докл. – Одесса – Киев, АТМ Украины, 2009. – С. 130 – 133.
4. Аль Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Качество поверхности при эльборовом шлифовании валов к гидравлическим насадочным прессам и к прессам для обжима буртов бандажей колес / С.А. Аль Аджейлат, В.Г. Лебедев // : мат. междунар. науч.-техн. конф., тезисы докл. – Одесса – Киев, АТМ Украины, 2006. – С. 51 – 54.
5. Резников А.Н. Теплофизика резания. М., "Машиностроение", 1969.

#### **Рецензенты**

**Лищенко Н.В.**, ст. преп., к.т.н., доцент.

**Ларшин В.П.**, преп., д.т.н. проф.

Стаття надійшла до редакції 29.03.2016.