

УДК 621.92:669.017

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.140982

## Исследование и анализ возможности бездиффузионных фазовых превращений в поверхностном слое детали под действием температур шлифования

А. В. Беспалова, В. Г. Лебедев, Н. Н. Клименко, Т. В. Чумаченко,  
И. В. Урядникова

*Досліджено та проаналізовано можливість бездифузійних фазових перетворень в поверхневому шарі шліфованої деталі під дією миттєвої температури шліфування. Це важливо, тому що фазові Fe $\alpha$ -Fe $\gamma$  перетворення, які можуть мати місце при шліфуванні деталей приводять до появи так званих шліфувальних прижогів, які в 2–3 рази знижують надійність і довговічність при експлуатації деталі в працюючому механізмі. Визначено механізм фазових перетворень, критична температура цих перетворень і пов'язані з цим режими обробки, які забезпечують цю температуру. Це дозволяє обґрунтовано підходити до визначення режимів шліфування і, в разі необхідності, до застосування методу охолодження. Крім того, може бути вирішена задача оптимізації режимів шліфування, якщо продуктивність обробки взяти як цільову функцію, а як обмеження взяти температуру шліфування.*

*При швидкому нагріванні температурою шліфування поверхні деталі з загартованої сталі вище лінії АС1 має місце зворотне мартенситне перетворення Fe $\alpha$ →Fe $\gamma$ . Мартенситний інтервал при охолодженні Мн-Мк в значній мірі охоплює негативні температури. Тому аустеніт частково фіксується в поверхневому шарі, утворюючи так званий прип'ік гарту. Залежності для визначення температури утворення аустеніту для сталі будь-якого хімічного складу, дають можливість при шліфуванні підтримувати значення температури шліфування нижче цього рівня. Розглянуто механізм бездиффузійного зворотного мартенситного перетворення при високошвидкісному нагріванні поверхні ріжучими зернами (миттєвої температурою). Експериментально визначено швидкість нагріву і вплив тиску, яке справляє абразивне зерно на метал при знятті стружки. Таким чином обґрунтована можливість бездифузійного фазового перетворення і дається залежності для розрахунку температур утворення аустеніту, що дає в свою чергу можливість розрахувати безпечні режими обробки*

*Ключові слова:* аустеніт, мартенсит,  $\gamma$ -залізо,  $\alpha$ -залізо, швидкість нагріву, температура перетворення мартенситний інтервал, поверхневий шар, критична температура

### 1. Введение

Вопрос повышения точности рабочих поверхностей деталей машин одновременно с повышением качественных характеристик затрагивает целый комплекс проблем: технологических, инструментальных, станочных.

В настоящее время высокое качество рабочих поверхностей деталей (износостойкость, жаростойкость, жаропрочность) часто обеспечивается путем наплавки на них соответствующих материалов. Речь идет о качественных сталях с последующей термообработкой таких поверхностей, что позволяет резко сокращать расход специальных дорогостоящих сталей и сплавов. Однако эти поверхности необходимо обрабатывать шлифованием для придания им необходимой точности и шероховатости.

При этом следует учитывать, что под действием температур шлифования достаточно часто возникают тепловые шлифовочные дефекты, связанные с фазово-структурными превращениями в прошлифованном поверхностном слое, которые называются шлифовочными прижогами. Характерный тепловой импульс, зафиксированный малоинерционной микротермопарой, показан на рис. 1 [1].

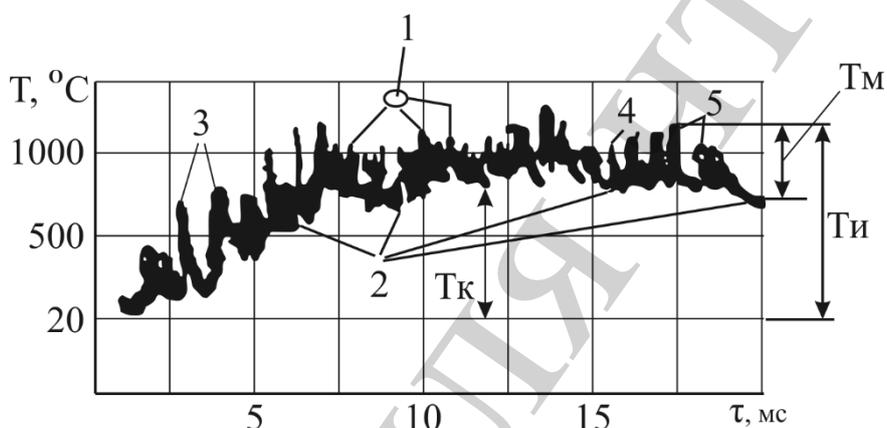


Рис. 1. Характерный вид теплового импульса при шлифовании: 1, 3, 4, 5 – температурные всплески от режущих зерен,  $T_k$  – контактная температура,  $T_m$  – мгновенная температура резания зерном,  $T_i$  – импульсная температура – сумма контактной и мгновенной

Импульсы, амплитуда которых измеряется от нижней огибающей до верхних пиковых значений, соответствуют температуре, которую приобретает заданная точка шлифуемой поверхности при резании ее зерном шлифовального круга.

Верхняя огибающая осциллограммы, мысленно проведенная по вершинам импульсов, соответствует импульсной температуре, которая является результатом суммирования контактной и мгновенной температур. Как видно из рис. 1, импульсная температура выше температуры, осредненной по пятну контакта, и частота ее воздействия на заданную точку поверхности соответствует частоте мгновенной температуры.

При быстром нагреве температурой шлифования поверхности шлифуемой детали из закаленной стали выше линии  $A_{c1}$  мартенситная структура поверхностного слоя переходит в аустенитную структуру, то есть имеет место обратное мартенситное превращение или фазовый переход  $Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma$  [2–5].

Превращение аустенита в мартенсит при охлаждении происходит не полностью поскольку мартенситный интервал  $M_n$ - $M_k$  в значительной мере охва-

тывает отрицательные температуры. Поэтому аустенит частично фиксируется в поверхностном слое, образуя так называемый прижог закалки.

Прижоги являются причиной высоких остаточных напряжений и трещин в поверхностном слое и снижают прочность, надежность и долговечность шлифованной поверхности, (часто в 2–3 раза) а, следовательно, и всей детали [4, 6].

В настоящее время имеется много новых низко- и высоколегированных сталей, которые широко используются при наплавке рабочих поверхностей деталей. Эти поверхности необходимо в дальнейшем шлифовать. Поэтому необходимо определить безопасные контактные температуры шлифования, которые не приводят к шлифовочным дефектам поверхностного слоя. Эти температуры можно определить с помощью аналитического исследования кинетики фазово-структурных превращений при шлифовании. Поэтому актуальной является разработка методики определения температуры образования аустенита для стали любого химического состава. При этом следует учитывать необходимость поддержания значения контактной температуры ниже этого уровня при шлифовании. Следует отметить, что при шлифовании имеет место сверхскоростной нагрев поверхности, в результате чего возможны различные механизмы образования аустенита. Диффузионный, бездиффузионный и бездиффузионный при высоких удельных давлениях, при вероятном образовании прижогов под действием мгновенной температуры. Можно с большой долей уверенности утверждать, что температура, при которой образовывается аустенит, будет зависеть от механизма его образования. Поэтому необходимо проанализировать все возможные механизмы.

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

В работе [7] подробно рассматривается диффузионное обратное мартенситное превращение, однако нет никаких сведений о возможном бездиффузионном превращении, которое может происходить при несколько иных температурах и при более высоких скоростях тепловых процессов. Если не учитывать этих обстоятельств, то можно получить тепловые шлифовочные дефекты.

Работы [2, 8] достаточно глубоко рассматривают вопрос и выводы адекватного отражения реальных процессов, однако эти результаты нуждаются в уточнении и некотором упрощении для использования результатов в практике работы цехов машиностроительных предприятий.

В работе [9] исследуется обратное мартенситное превращение в сталях, легированных Cr–Ni–Mo. Начальная структура – отпущенный мартенсит и карбиды хрома. Исследовалось превращение начальной крупнозернистой структуры в мелкозернистую полигональную структуру. Это чисто металловедческое исследование, результаты которого трудно приложить к исследуемому вопросу, поскольку при шлифовании практически невозможно даже искусственно создать условия, подобные условиям эксперимента.

Теперь, если обратиться к работам [10–12], то можно увидеть, что в этих работах глубоко рассмотрены фазовые и структурные превращения (шлифовочные прижеги). Однако нигде не рассматриваются ни механизмы этих пре-

вращений, ни температурные зависимости образования прижогов для сталей различного химического состава.

В работе [13] рассматривается влияние начальных размеров зерен аустенита на мартенситно-аустенитное превращение, однако нет никаких сведений о возможности бездиффузионного превращения.

В работе [14] рассмотрено мартенситно – аустенитное превращение в мелкозернистых сталях с метастабильным аустенитом. Однако сведений о механизме превращения нет.

Работа [15] рассматривает мартенситные превращения в низколегированных сталях при периодических быстропротекающих актах нагрева. В этой работе также нет упоминаний о механизме превращения.

В работе [16] рассматривается процесс закалки при шлифовании коленчатого вала. Упрочнение поверхности может происходить за счет фазово наклепанного аустенита. Механизм превращения не упоминается.

В работе [17] рассматривается влияние остаточного аустенита и остаточных напряжений на контакт качения. Рассматриваются последствия образованного аустенита, но не механизм его образования.

В работе [18] рассматривается использование обратного мартенситного превращения на стабилизацию аустенита. Механизм обратного мартенситного превращения не рассмотрен.

В работе [19] фазовое воздействие термоциклирования на мартенситное превращение. Однако механизм обратного мартенситного превращения не рассмотрен.

В работе [20] рассматривается изменение структурного состава и механических свойств хромо-никель-молибденовой стали в процессе термической обработки. Механизм фазовых и структурных превращений не описан.

Таким образом, необходимо отметить, что в литературе не выявлены данные, которые объясняли бы возможное бездиффузионное обратное мартенситное превращение при шлифовании закаленных сталей и значения температур, при которых при этом образовывается аустенит.

В работах [3, 4, 6, 9, 21–25] рассмотрен механизм диффузионного образования аустенита из мартенсита (обратное мартенситное превращение) в железоуглеродистых сплавах при скоростях нагрева до  $10 \cdot 10^8$  °C/с. Однако при нагреве металла мгновенной или импульсной температурой, когда скорости нагрева еще выше и когда процессы диффузии подавлены, вполне возможен вариант бездиффузионного обратного мартенситного превращения. В этом случае температура образования аустенита (шлифовочного прижога закалки) будет иной. Поэтому чтобы подобрать параметры процесса шлифования, которые исключали бы появление прижогов, необходимо определить, при каких температурах может произойти бездиффузионное превращение мартенсит→аустенит.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью работы является установление возможности и закономерности бездиффузионных фазовых превращений  $\alpha \rightarrow \gamma$  в закаленном поверхностном слое шлифуемой детали под действием мгновенной температуры шлифования. Это

позволит оценить совместное влияние скоростных тепловых процессов при шлифовании и химического состава шлифуемой поверхности, для назначения безопасных температур, а, следовательно, и режимов обработки.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

– определить скорости нагрева поверхности, когда контактная температура ниже и выше точки  $A_{C1}$ ;

– установить возможность бездиффузионного обратного мартенситного превращения по схеме мартенсит→аустенит при высокоскоростном нагреве поверхности на основе чего определить температуры, при которых происходит образование аустенита для различных сталей.

#### **4. Материалы и методы исследований фазово-структурных превращений в поверхностном слое шлифуемой детали**

Исследования проведены с применением экспериментальных измерений температур и скоростей нагрева с использованием закладных микротермопар и электронных осциллографов. В качестве материалов использованы доэвтектоидные стали 40X; 40A, эвтектоидная сталь У8, заэвтектоидные – цементованные и закаленные стали 12X2H4A, 20XH3A (1,2 % углерода).

#### **5. Аналитические и экспериментальные исследования**

К особенностям процесса нагрева металла при шлифовании следует отнести малые размеры теплового источника и значительную мощность этого источника, что обеспечивает высокую интенсивность теплового потока и малое время теплового воздействия этого источника на металл.

В принципе, образование в поверхностном слое структуры аустенита (прижога закалки) возможно в результате трех процессов.

1. Диффузионный путь – путем скоростного отпуска мартенсита по схеме  $M \rightarrow P \rightarrow A$  (мартенсит→перлит→аустенит).

2. Бездиффузионный путь (при воздействии на металл короткого импульса мгновенной или импульсной температуры), когда происходит мгновенная перестройка кристаллической решетки по схеме  $M \rightarrow A$ .

3. Бездиффузионный путь при высоком контактном давлении режущего зерна, приводящего к снижению температуры точки  $A_{C1}$ .

Скорости нагрева при шлифовании оцениваются как  $10^6 - 10^{10} \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$  [8, 21].

В ряде случаев при условии скоростей нагрева  $10^6 - 10^8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$  возможен диффузионный распад мартенсита и образование ферритно-перлитных структур. В работе [22] приводятся скорости нагрева и температурные интервалы, при которых это возможно (рис. 2).

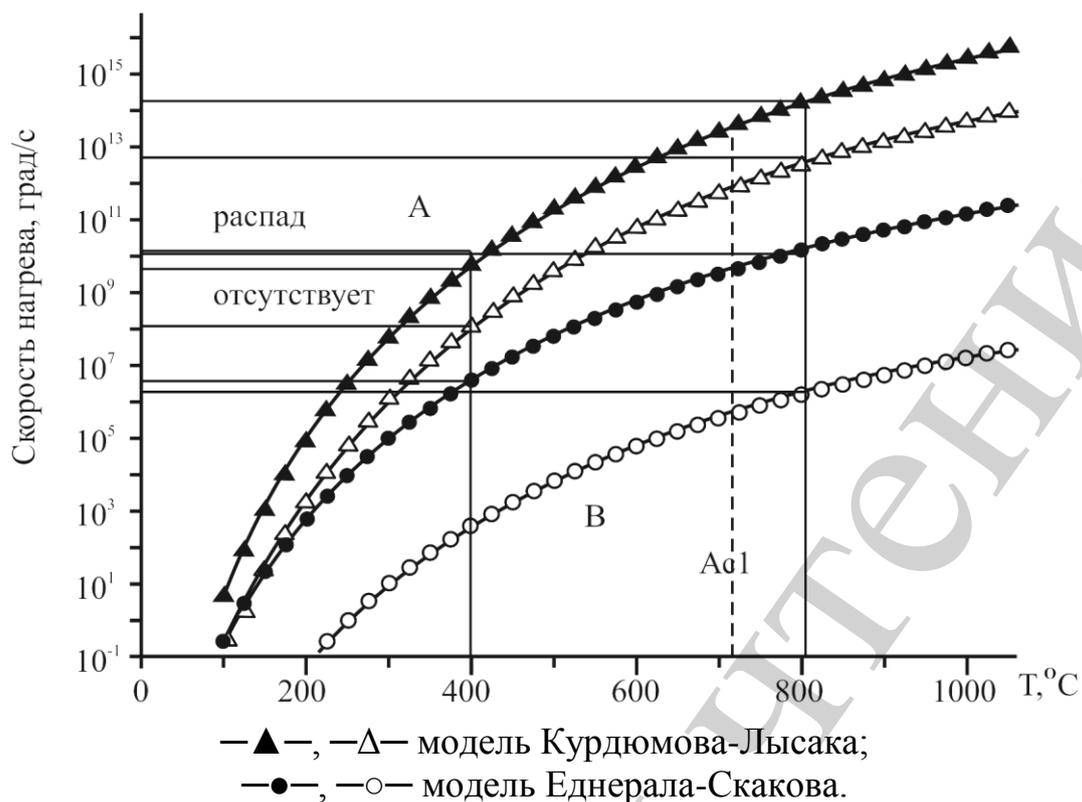


Рис. 2. Области возможного диффузионного распада мартенсита в зависимости от скорости нагрева

Как видно из рис. 2, при нагреве в районе  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что характерно для температуры 3-го превращения отпуска, диффузионный распад мартенсита может происходить при скоростях нагрева  $1,8 \cdot 10^6 - 1,6 \cdot 10^7\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ .

При температуре нагрева порядка  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что значительно выше точки  $A_{c1}$ , диффузионный распад мартенсита может происходить при скоростях нагрева порядка  $1,3 \cdot 10^6 - 1,1 \cdot 10^7\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ . При более высоких скоростях нагрева диффузионный распад мартенсита невозможен. Экспериментальное измерение скоростей нагрева проводилось по осциллограммам температур, измеренных закладными микротермопарами с регистрацией на электронном осциллографе.

Для получения широкого диапазона контактных температур был выбран шлифовальный круг из КНБ: ЛО 180/150V1 100 % и режимы шлифования  $V_{кр}=35\text{ м/с}$ ,  $V_{дет}=V_u=0,66\text{ м/с}$ , глубины шлифования  $t=0,015; 0,02; 0,04\text{ мм}$ .

Соответствующие контактные температуры будут составлять:  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $770\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Измеряя скорости нагрева в диапазоне температур от  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $A_{c1}$ , можно получить следующие значения:  $V_{0,04}=3 \cdot 10^6\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ ;  $V_{0,02}=2 \cdot 10^6\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ ;  $V_{0,015}=0,3 \cdot 10^6\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ .

Следовательно, скорости нагрева поверхности могут укладываться в диапазон скоростей диффузионного превращения, показанных на рис. 2.

Чем выше температура, тем быстрее завершается диффузионный процесс перераспределения углерода в аустените [14].

Ряд академических источников, например, [23], указывают, что бездиффузионное сдвиговое обратное мартенситное превращение в сталях вряд ли возможно из-за высокой скорости диффузии. Это конечно справедливо при скоростях нагрева и охлаждения, имеющих место при обычной термической обработке. Однако при шлифовании, когда могут создаваться такие сочетания режимов обработки, когда скорости нагрева несопоставимо больше скоростей диффузии, такое превращение возможно, что доказывают эксперименты по измерению температур и скоростей нагрева от единичных зерен.

На рис. 3 показана часть теплового импульса “вырезка” из контактной температуры, состоящая из импульсов от нескольких зерен (мгновенная температура) на скорости развертки порядка  $2,5 \cdot 10^{-7}$  с/клетка и при вертикальном масштабе  $150^\circ\text{C}/\text{клетка}$  (запоминающий осциллограф С8-9А).

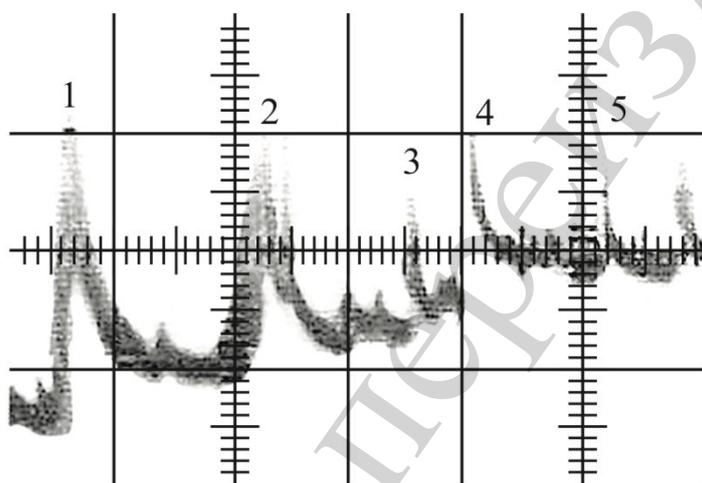


Рис. 3. Вырезка из теплового импульса контактной температуры

Сопоставляя полуширину импульса (время нагрева) и высоту импульса (температуру нагрева), можно получить среднюю скорость нагрева металла температурой от резания зерном (мгновенной температурой). Если рассмотреть импульсы 1; 2; 3; 4; 5, то используя масштаб можно составить табл. 1.

Таблица 1

Значения мгновенных температур поверхности, времени нагрева и скорости нагрева

№ имп.	1	2	3	4	5
$T_{\text{пов}}$ – температура поверхности, $^\circ\text{C}$	390	300	195	255	180
$\tau_{\text{нагр}}$ – время нагрева, с	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-8}$
$V_{\text{нагр}}$ – скорость нагрева, $^\circ\text{C}/\text{с}$	$1,56 \cdot 10^{10}$	$1,71 \cdot 10^{10}$	$1,56 \cdot 10^{10}$	$1,46 \cdot 10^{10}$	$1,44 \cdot 10^{10}$

Средняя скорость нагрева составит  $1,546 \cdot 10^{10}$  °C/с. Обработка 20 таких “вырезов” дает интервал скорости нагрева  $1,675 \cdot 10^{10}$ – $1,446 \cdot 10^{10}$ . Сопоставляя эти данные с рис.2 можно видеть, что скорость нагрева металла мгновенной температурой выходит в область, где диффузионные превращения невозможны. Таким образом, если диффузионные превращения невозможны, а аустенит все-таки есть, то можно утверждать, что он образовался бездиффузионно, за счет сдвига кристаллической решетки. На микрошлифе такой аустенит просматривается как мелкие небольшие пятна неправильной формы (рис. 4, 5).

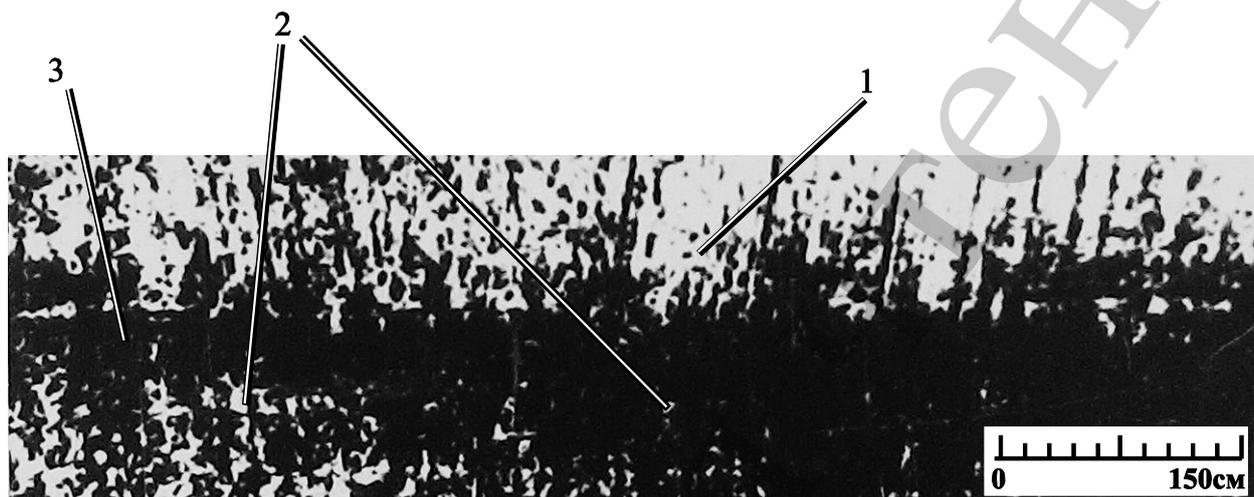


Рис. 4. Микрошлиф типа “косой срез” 5°. 1 – окончание шлифованной поверхности, 2 – мелкие пятна аустенита, 3 – отпущенный слой  $\times 150$

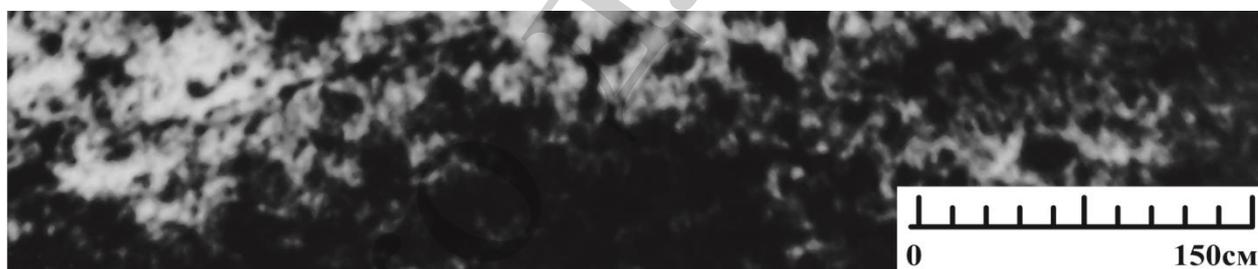


Рис.5. Микрошлиф шлифованной поверхности. Темное поле отпуска и белые пятна аустенита  $\times 150$

Таким образом, бездиффузионное обратное мартенситное превращение при шлифовании возможно и может происходить под действием высокоскоростного нагрева мгновенной температурой.

Образование аустенита из мартенсита – бездиффузионное, и в интервале превращения состав фаз постоянный. Температурный интервал обратного мартенситного превращения ( $A_n$ – $A_k$ ), зависящий в первую очередь от состава сплава, располагается выше температуры равновесия  $T_0$  (когда свободные энергии аустенита и мартенсита равны). Это хорошо показано в работе [25]. Работа теоретическая и линии  $A_n$  и  $M_n$ , получены исходя из термодинамических закономерностей. Расчеты проведены на малоуглеродистых сталях с различным со-

держанием никеля, поскольку никель оказывает существенное влияние на характер мартенситного превращения [23].

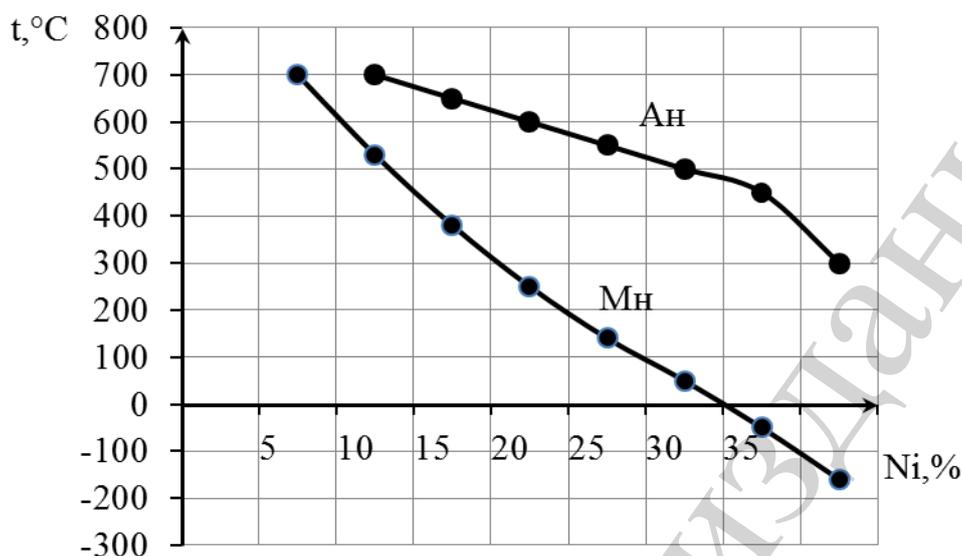


Рис. 6. Температуры начала прямого  $M_n$  и обратного  $A_n$  мартенситного превращения [23]

В работе [25] малоуглеродистая сталь с различным содержанием  $Ni$  очевидно выбрана авторами для примера, поскольку на такой стали обратное бездиффузионное мартенситное превращение реализуется при сравнительно невысоких скоростях нагрева, характерных для режимов промышленной термообработки.

Предполагая (из приведенных выше результатов шлифования), что бездиффузионное обратное мартенситное превращение возможно, необходимо иметь в виду, что, как указано в работе [23], имеет место температурный гистерезис порядка  $150\text{--}200\text{ }^\circ C$ . То есть мартенсит образуется при температуре ниже равновесной, а аустенит образуется при температуре выше равновесной. В этом случае широко известная диаграмма образования мартенсита [23] с нанесением на нее линии  $T_0$  и линии  $A_n$  предположительно может выглядеть так, как представлено на рис. 7. Таким образом, предположительно для доэвтектоидных сталей при сверхскоростном нагреве температуры образования аустенита следует ожидать в районе  $700\text{ }^\circ C$ , для эвтектоидных сталей в районе  $550^\circ$ , а для заэвтектоидных сталей в районе  $450\text{--}500\text{ }^\circ C$ .

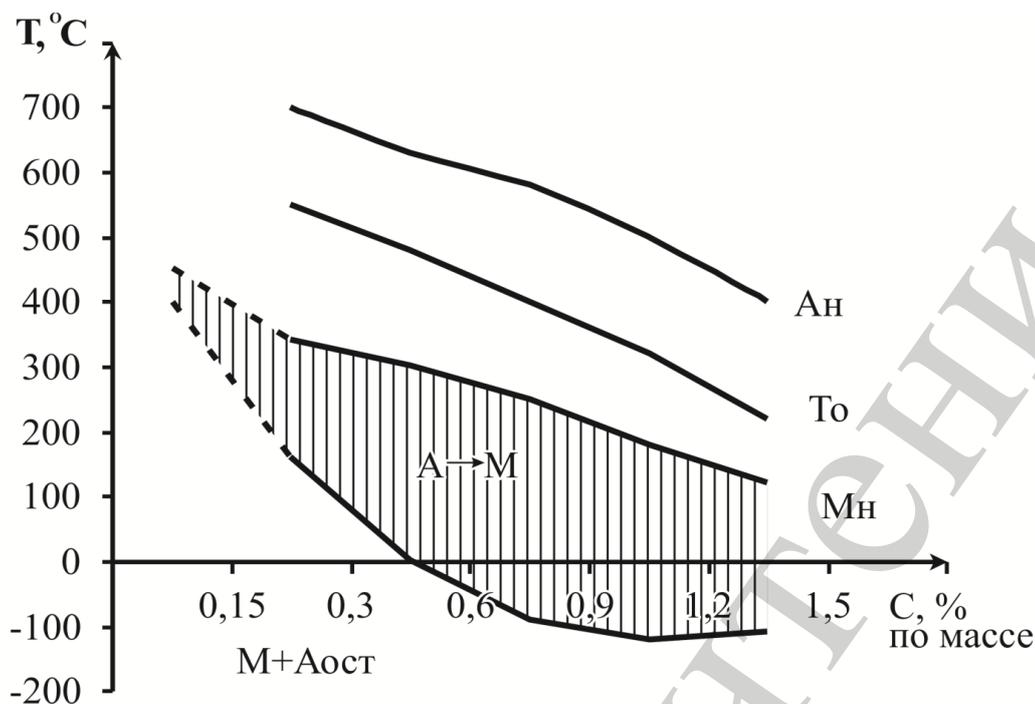


Рис.7. Предполагаемое положение линий  $T_0$  (равновесная температура) и  $A_n$  (температура начала образования аустенита)

Указанное предположение в некоторой степени подтверждается данными работы [26], хотя и без графиков, но математически.

Проведено шлифование образцов из сталей 40X; 40A, У8, цементированных и закаленных сталей 12X2H4A, 20XH3A, при этом в каждом образце находилась микротермопара [1] зернистость круга была не менее 25–40 для получения больших импульсов на экране, для каждой стали отбиралось по 5 образцов. Режимы шлифования подбирались таким образом, чтобы нижняя огибающая импульсов контактной температуры имела значение не более 450 °C (граничная температура, при которой начинается 3-е превращение отпуска), а крупные импульсы были на 100–300 °C выше. После шлифования образцов (5 образцов из каждой стали, для каждой скорости вращения круга – 20; 35; 50 м/с) из каждого образца изготовлялся микрошлиф по схеме, которая используется в любой металлографической лаборатории [27]. Полученные микрошлифы просматривались на широко известном металломикроскопе МИМ-7 [28] для определения наличия аустенита. Таким образом, по величине импульсов (например, рис. 2) определялась средняя мгновенная температура шлифования, а микрошлиф из этого же образца давал ответ о наличии аустенита, без каких-либо количественных значений, а по принципу “да” или “нет”. Задача определения количества аустенита не ставилась, поскольку это самостоятельное весьма объемное исследование. Средние значения температур рассчитывались по методике [29]. Результаты измерений и наблюдений сводились в таблицу, пример которой показан ниже для первой серии из пяти образцов для скорости вращения круга 35 м/с (табл. 2).

Таблица 2

Результаты сопоставления величины мгновенных температур и наличия аустенита

Сталь	40Х	40А	У8	12Х2Н4А	20ХН3А
$T_{\text{мгн}}$ – средняя мгновенная температура °С	530	530	520	515	520
Наличие аустенита на микрошлифе	+	+	+	+	+
$\tau_{\text{нагр}}$ – среднее время нагрева, с	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$
$V_{\text{нагр}}$ – средняя скорость нагрева, °С/с	$2,65 \cdot 10^{10}$	$2,65 \cdot 10^{10}$	$2,36 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{10}$

Результаты были несколько неожиданные, поскольку образование аустенита происходило при температуре порядка  $550 \pm 28,6$  °С (размер выборки 10, из общего числа измерений и наблюдений 25).

Необходимо ответить на вопрос, почему получены такие низкие температуры  $A_n$ . Для этого необходимо вспомнить, что при резании металла зерном возникает система из двух сил  $P_z$  и  $P_y$ , которые являются составляющими силы резания. Причем первая сила называется силой стружкообразования, а вторая – силой давления режущего зерна на металл. (рис. 5 [30]) Радиусы закругления режущих вершин зерна чрезвычайно малы. Для зерен электрокорунда это величины 10–15 мкм. Площадь контакта зерна с металлом чрезвычайно мала и составляет  $S_{\text{пов}} = 2\pi R_z h$  как поверхности шарового сектора, величины которого отсекаются величиной  $h$ , иными словами глубиной внедрения зерна в металл (рис. 8).

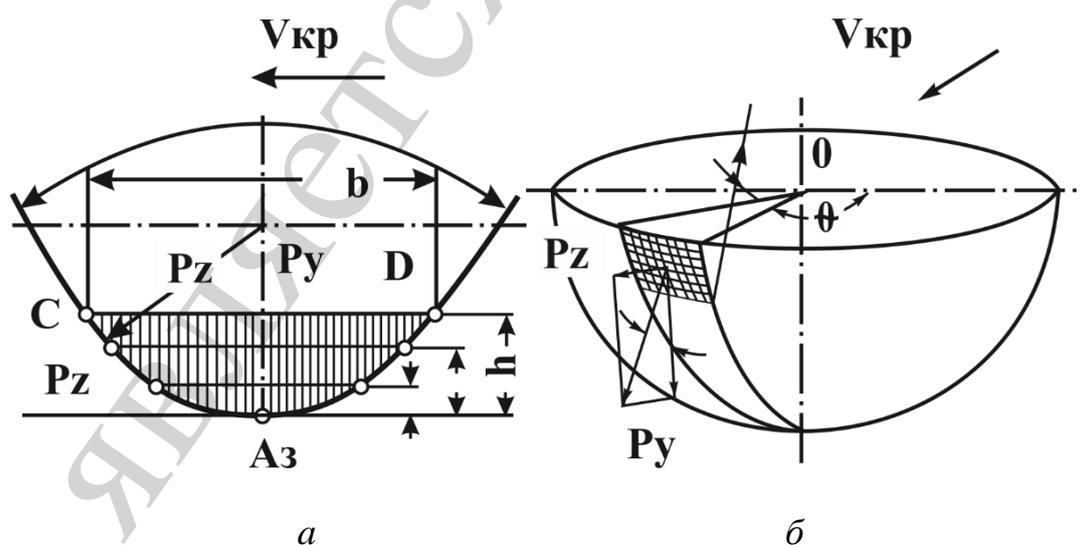


Рис.8. Схемы закругленных вершин режущих зерен [30]:

*a* – проекция сечения закругленной вершины зерна на плоскость,

*б* – вид в аксонометрии закругленной вершины зерна

Для условий круглого и плоского шлифования с глубиной шлифования 0,02–0,05 мм и при зернистости кругов 16–25, радиусы закругления зерна составляют 10–15 мкм, глубина внедрения зерна в металл составляет 2–4 мкм, сила  $P_y$  составляют величину 15–20 Н [30]. Для такого случая давление на площадке контакта зерна с металлом составит величину

$$P_3 = \frac{P_y}{2\pi R_z \cdot h}, \quad (1)$$

где  $P_3$  – значение давления на металл “под зерном”;  $P_y$  – величина силы, Н;  $R_z$  – радиус закругления вершинки зерна, м;  $h$  – средняя величина внедрения зерна в металл, м.

Для указанных выше условий  $P_3$  составит  $2,17 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup> или 21,7 ГПа. Следовательно, бездиффузионное образование аустенита при шлифовании необходимо рассматривать не только под действием мгновенной температуры, но и под действием высокого давления.

Для учета давления режущего зерна на металл при образовании аустенита за счет нагрева мгновенной температурой можно воспользоваться зависимостями, изложенными в работах [24, 31], где показано, что в условиях давления линия равновесия модификаций  $\alpha \rightarrow \gamma$  имеет вид рис. 9 [24, 31].

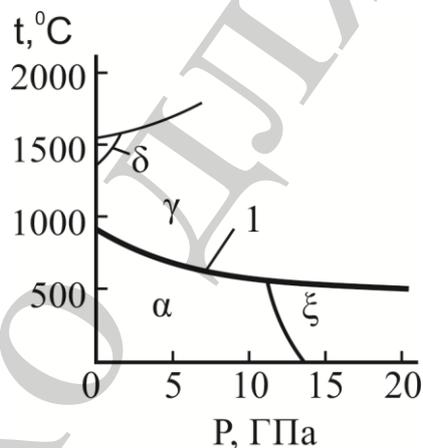


Рис. 9. Линия равновесия  $\alpha \rightarrow \gamma$  для железа, в зависимости от температуры и давления [24, 30]

Как видно из рис. 9, линия равновесия между фазами  $\gamma$  и  $\alpha$  при повышении давления значительно снижается. Однако в области давления порядка 15–20 ГПа линия равновесия стабилизируется на уровне температуры около 500 °С. Именно такое давление оказывают режущие зерна на металл при шлифовании.

Следует отметить, что радиусы закругления зерен и средняя глубина внедрения зерна при изменениях режимов шлифования все равно будут находиться в вышеуказанных пределах, поэтому процесс бездиффузионного образования аустенита будет происходить при давлении порядка 20 ГПа и, как следствие этого, при температурах порядка 500 °С.

Для практического использования составлена таблица 3 температур, выше которых обнаруживается аустенит для сталей, которые использованы в настоящем исследовании.

Таблица 3

Ориентировочная температура образования аустенита при бездиффузионном  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении под действием мгновенной температуры с учетом давления в точке контакта зерна и металла

Исходные данные		$A_{нi}$		
$v_k, \text{ м/с}$	$v_n, \text{ }^\circ\text{C/с}$	Доэвтектоидные ста стали 40X и сталь 40А 40А - 0,4 % С	Эвтектоидная ста сталь У8 0,8 % С 0,8	Заэвтектоидная цементированная и закаленная сталь 12Х2Н4А и 20Х13Н2А 1,2 % С
20	$4 \cdot 10^9$	528	521	524
35	$12 \cdot 10^9$	530	522	525
50	$25 \cdot 10^9$	531	524	527

*Примечание: средняя скорость нагрева рассчитана в интервале 500...1000 °С*

Полученные результаты могут рассматриваться как ориентировочные в практике работы механических цехов, где производится шлифование ответственных деталей из закаленной стали.

### **6. Обсуждение результатов исследования возможности бездиффузионных фазовых превращений в поверхностном слое шлифуемой детали из закаленной стали**

Исследования, проведенные в настоящей работе, показывают, что при определенных параметрах шлифовальной операции возможны скорости нагрева поверхности порядка  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ }^\circ\text{C/с}$  и выше. При таких скоростях нагрева невозможно диффузионное превращение мартенсит  $\rightarrow$  аустенит, но появляется возможность бездиффузионного сдвигового обратного мартенситного превращения. Это превращение на трассах движения зерен может происходить при повышенном давлении зерен на шлифуемый металл, что снижает точку  $A_n$ , в результате чего образование аустенита может происходить при более низких температурах, что естественно следует учитывать при назначении режимов шлифования. Следует отметить, что условия преобладающего влияния мгновенной температуры (температуры резания зерном) могут создаваться при шлифовании сравнительно редко, когда сравнительно крупнозернистым кругом (например, зернистости 400/250) необходимо снять незначительные припуски порядка 0,01–0,025 мм.

Как показали результаты исследования, бездиффузионный механизм обратного мартенситного превращения возможен при шлифовании закаленных сталей под действием мгновенной температуры шлифования. Значительное влияние в этом процессе имеет давление режущего зерна при резании на по-

верхность стали, величина которого под действием силы  $P_u$  может достигать значений порядка 20 ГПа

Значительное отличие прижога закалки при бездиффузионном превращении мартенсита в аустенит состоит в том, что он не лежит на слое перлита (поскольку перлитное превращение не успевает произойти)

Поскольку температура образования аустенита при действии давления зерен ниже, то для проектирования режимов операции шлифования целесообразно пользоваться данными табл. 1.

Результаты исследования позволяют более грамотно проектировать операцию шлифования ответственных деталей из закаленной стали, исключив такие параметры процесса шлифования, при которых возможно бездиффузионное фазовое превращение  $M \rightarrow A$ .

Несмотря на большое количество работ, посвященных прижогам, при шлифовании деталей из закаленных сталей вопрос прижогов под действием мгновенной температуры не рассматривается и нет никаких рекомендаций по предотвращению таких тепловых дефектов.

Недостатком данного исследования следует считать то, что эксперименты выполнены только на малоуглеродистых сталях и на хромоникелевых цементированных и закаленных. Эксперименты выполнены в минимальном объеме из-за очень большой трудоемкости последних.

К работе стоило бы приложить физическое моделирование с помощью плазменного луча. В настоящее время достаточно много исследований в области плазменной закалки, скорости нагрева при которой сопоставимы со скоростями нагрева мгновенной температурой, но в этих работах превращение  $M \rightarrow A$  не рассматривается.

## **7. Выводы**

1. Скорости нагрева поверхности, мгновенной температурой шлифования при которых возможно бездиффузионное обратное мартенситное превращение, составляют величину порядка  $1,5-2,0 \cdot 10^{10} \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ . Бездиффузионный механизм превращения мартенсита в аустенит в сталях разного химического состава возможен из-за высокой скорости нагрева, при которой диффузионные процессы подавлены.

2. Предельные мгновенные температуры, при которых уже может начаться образование аустенита, составляют  $500-550 \text{ }^\circ\text{C}$ , причем температура дополнительно снижается за счет высокого давления, которое оказывает режущее зерно на металл. Скорости нагрева, при которых диффузионные процессы подавлены в результате действия мгновенной температуры, чаще всего возникают при шлифовании достаточно крупнозернистыми кругами при малых глубинах резания. Зернистость круга порядка 400/250 и глубина шлифования порядка 0,01–0,02 мм., скорость вращения круга порядка 30 м/с.

## Литература

1. Чумаченко Т. В. Технологическое обеспечение качества и производительности обработки поверхностей шеек валов роторов газовых турбин, напыленных минералокерамикой: дисс. ... канд. техн. наук. Одесса, 2011. 163 с.
2. Лебедев В. Г., Клименко Н. Н., Аль-Аджелат С. А. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей // Наукові нотатки. 2013. № 40. С. 141–144.
3. Лободюк В. А., Эстрин Э. И. Мартенситные превращения. М.: Физмалит, 2009. 352 с.
4. Кремень З. И., Юрьев В. Г., Бабошкин А. Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Политехника, 2015. 424 с.
5. Биронт В. С. Теория термической обработки. Красноярск, 2007. 234 с.
6. Влияние теплоты, образующейся при шлифовании // Библиотека технической литературы. URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/39/76.htm>
7. Martensite transformations in the surface layer at grinding of parts of hardened steels / Lebedev V., Klimenko N., Uryadnikova I., Chumachenko T., Ovcharenko A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, Issue 12 (87). P. 56–63. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103149>
8. Лебедев В. Г., Клименко Н. Н. Закономерности образования прижогов отпуска при шлифовании подшипниковых сталей // Перспективні технології та прилади. 2015. № 6. С. 35–40.
9. Федотов А. К. Физическое материаловедение. Т. 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах. Минск: Высшая школа, 2012. 446 с.
10. Александрова М. Ю., Добрынин С. А., Фирсов Г. И. Моделирование температурного поля на поверхности детали при наружном бесцентровом шлифовании // Вестник научно-технического развития. Национальная Технологическая Группа. 2008. № 10 (14). С. 46–53.
11. Кремень З., Юрьев В., Бабошкин А. Технология шлифования в машиностроении. Litres, 2017. 425 с.
12. Тепловые явления при внутреннем шлифовании с продольной подачей / Салов П. М., Салова Д. П., Виноградова А. Г., Сайкин С. С. // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2016. № 1. С. 42–47. doi: <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2016-1-42-47>
13. Influence of prior austenite grain size on martensite–austenite constituent and toughness in the heat affected zone of 700MPa high strength linepipe steel / Li X., Ma X., Subramanian S. V., Shang C., Misra R. D. K. // Materials Science and Engineering: A. 2014. Vol. 616. P. 141–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.07.100>
14. Rajasekhara S., Ferreira P. J. Martensite→austenite phase transformation kinetics in an ultrafine-grained metastable austenitic stainless steel // Acta Materialia. 2011. Vol. 59, Issue 2. P. 738–748. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.012>
15. Kaluba W., Kaluba T., Zielinska-Lipiec A. Morphological Evolutions in Steels during Continuous Rapid Heating // Materials Science Forum. 2007. Vol. 539–543. P. 4669–4674. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.539-543.4669>

16. Li C. H., Ding Y. C., Lu B. H. Innovative Technology Investigation into Integrate the Surface Hardening Process with the Grinding Precision Finishing for CBN Grinding Crankshaft // 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008. doi: <https://doi.org/10.1109/wicom.2008.3039>
17. Xu Y. The role of retained austenite and residual stresses in rolling contact // DigitalCommons@University of Nebraska – Lincoln. 1993. URL: <http://digitalcommons.unl.edu/dissertations/AAI9611077/>
18. Use of the reverse martensitic transformation and precipitation to enhance the strength and stability of austenite / Jin S., Huang D., Morris J. W. Jr., Thomas G. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010. 18 p.
19. Phase impact of thermal cycling on reversibility and anelastic-transformations of martensitic transformation in Fe-22Mn-3Si alloy / Golovin I. S., Komissarov A. A., Kustov S. B., Maikranz-Valentin M., Siemers C. // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2010. Vol. 32, Issue 2. P. 191–201.
20. Analyse des évolutions structurales et du comportement mécanique d'un acier au chrome-nickel-molybdène à très bas carbone du type Z1CND12-09-02, en fonction des traitements thermiques. URL: <https://www.theses.fr/1989PA112002>
21. Definition of the amount of heat released during metal cutting by abrasive grain and the contact temperature of the ground surface / Lebedev V., Klimenko N., Chumachenko T., Uryadnikova I., Ovcharenko A. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, Issue 7 (83). P. 43–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81207>
22. Mirzoev D. A., Mirzoev A. A., Chirkov P. V. Leave martensite in the input of rapid heating // *Bulletin of SUSU. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2016. Vol. 8, Issue 1. P. 61–65.
23. Гуляев А. П. *Металловедение*. Москва, 2011. 643 с.
24. Бланк В. Д., Эстрин Э. И. *Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении*. Москва, 2011. 412 с.
25. Kaufman L., Cohen M. Thermodynamics and kinetics of martensitic transformations // *Progress in Metal Physics*. 1958. Vol. 7. P. 165–246. doi: [https://doi.org/10.1016/0502-8205\(58\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0502-8205(58)90005-4)
26. Ткаченко И. Ф. Расчетное определение температуры равновесия между аустенитом и мартенситом // *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 1997. Вып. 3. С. 81–82.
27. Методика приготовления микрошлифа. URL: <https://infourok.ru/laboratornaya-rabota-metodika-prigotovleniya-mikroshlifa-852852.html>
28. Микроскоп МИМ-7. URL: <http://mikroskop-1.ru/?name=Mikroskopy~МИМ-7&ref>
29. Горлач В. В., Егоров В. Л., Иванов Н. А. *Обработка, представление, интерпретация результатов измерений*. Омск: Издательство СибАДИ, 2006. 85 с.
30. Маслов Е. Н. *Теория шлифования материалов*. М.: Машиностроение, 1984. 320 с.
31. Любов Б. Я. *Кинетическая теория фазовых превращений*. М.: Металлургия, 2013. 375 с.