

УДК 621.791

А.А. Якимов, д-р техн. наук, В.Г. Лебедев, д-р техн. наук,  
Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук, Н.Н. Клименко, канд. техн. наук,  
С.В. Безнос, Одесса, Украина

## **ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ, РЕАЛИЗУЕМОЙ НА ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТЫМИ КРУГАМИ**

*У статті розглянуті передбачувані закономірності зміни розмірів зерен металу в поверхневому шарі деталі, прошифрованої переривчастим кругом.*

*Ключові слова: температура шліфування, термоциклірування, переривчастий шліфувальний круг*

*В статье рассмотрены предполагаемые закономерности изменения размеров зерен металла в поверхностном слое детали, прошифрованной прерывистым кругом.*

*Ключевые слова: температура шлифования, термоциклирование, прерывистый шлифовальный круг*

*In the article the assumed dependencies of the change in the dimensions of the metal grains in the surface layer of the part, processed with a discontinuous grinding wheel, are considered.*

*Key words: grinding temperature, thermocycling, discontinuous grinding wheel*

### **Введение**

Измельчение зерна является одним из самых эффективных способов повышения характеристик прочности, т.к. не сопровождается охрупчиванием стали [1]. Циклическая термическая обработка является наиболее простым и экономичным способом получения сверхмелкого зерна в сталях [2]. Технология термоциклической обработки заключается в многократном воздействии (чаще всего от 4 до 7 раз) на стали ускоренным изменением температуры при нагревах и охлаждениях с целью быстрого и принудительного формирования структуры и получения нужных механических свойств. В практике промышленного производства наибольшее распространение получил следующий способ термоциклической обработки конструкционной и инструментальной сталей: 4-7-кратный ускоренный нагрев изделий до температур на 40-60 °С выше критической температуры перлит-аустенитного превращения ( $A_{c1}$ ) с последующим охлаждением до температур на 40-60 °С ниже температуры обратного аустенит-перлитного превращения ( $A_{r1}$ ).

### **Цель работы**

Определение оптимальной технологии формирования свойств поверхностных слоев деталей при термоциклической обработке, реализуемой на операции шлифования прерывистыми кругами.

### Основная часть

Известно, что при термоциклической обработке доэвтектоидных сталей можно добиться мелкозернистой структуры, обеспечивающей повышение эксплуатационных характеристик.

Если охлаждение с последнего нагрева производить на воздухе, то получается структура сверхмелкозернистой смеси феррита и перлита. Если охлаждение с последнего нагрева проводить в воде, то образуется сверхмелкозернистый мартенсит. Измельчение структуры дает резкое увеличение пластичности и вязкости сталей при сохранении или увеличении значений прочностных свойств [3, 4] (рис. 1).

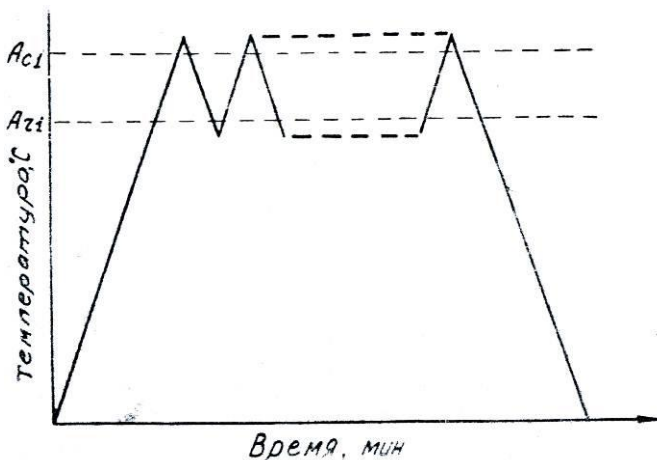


Рисунок 1 – Схема режима маятниковой термоциклической обработки

В работах [5, 6] показано, что у стали 45 полное измельчение зерен осуществляется за 5 циклов, при этом зерна с бальностью 5-6 в результате термоциклической обработки превращаются в зерна с бальностью 11-12. В работе [7] такая термоциклическая обработка названа маятниковой, так как температурный интервал термоциклирования находится вблизи температуры начала перекристаллизации. Изучением термоциклической обработки посвящены работы [8, 9, 10].

В работах [10, 11, 12] установлено, что температура  $A_{c1}$  зависит от скорости нагрева. Чем больше скорость нагрева, тем выше значение  $A_{c1}$ . Изменение температуры  $A_{r1}$  в зависимости от скорости охлаждения имеет противоположную закономерность. Чем больше скорость охлаждения, тем ниже значения  $A_{r1}$  (рис. 2) [10].



$\rho$ ,  $\lambda$ ,  $c$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>), теплопроводность (Дж/(м·с·°C)) и теплоемкость (Дж/(кг·°C)) обрабатываемого материала соответственно;

$k$  – число режущих выступов, принявших участие в перерезании адиабатического стержня, расположенного по нормали к обрабатываемой

поверхности: 
$$k = \frac{\sqrt{D_{кр} \cdot t}}{V_{дет}} \cdot \frac{V_{кр}}{(l'_1 + l'_2)}$$
;

$l'_1$ ,  $l'_2$  – длина режущего выступа и длина прорези (впадин) соответственно;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с,  $\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$ .

На рис. 3 приведены кривые, характеризующие кинетику нарастания температуры в точке обрабатываемой поверхности по мере удаления над ней металла отдельными режущими выступами круга, рассчитанные для трех разных режимов шлифования.

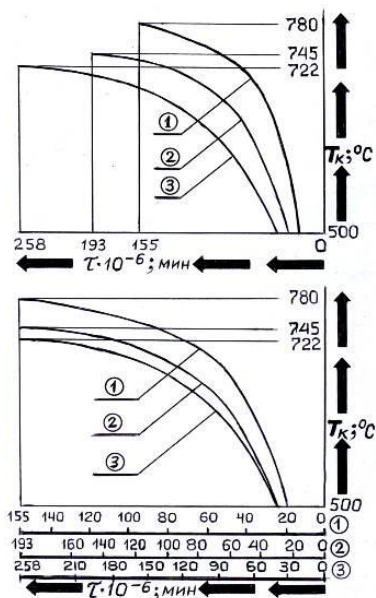


Рисунок 3 – Расчетные поверхностные температуры, формируемые при шлифовании плоских образцов из стали 45 прерывистым кругом ( $l_1 = l_2 = 0,0277$  м,  $n=14$ ) на режимах:  $V_{кр}=30$  м/с,  $t=6 \cdot 10^{-5}$  м,  $V_{д}=15$  м/мин (режим №3),  $V_{д}=20$  м/мин (режим №2),  $V_{д}=25$  м/мин (режим №1)

На рис. 4 приведены осциллограммы температур, расшифровка которых показали что разность между наибольшими и наименьшими температурными всплесками в среднем равна разности температур ( $A_{c1}+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )-( $A_{r1}-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

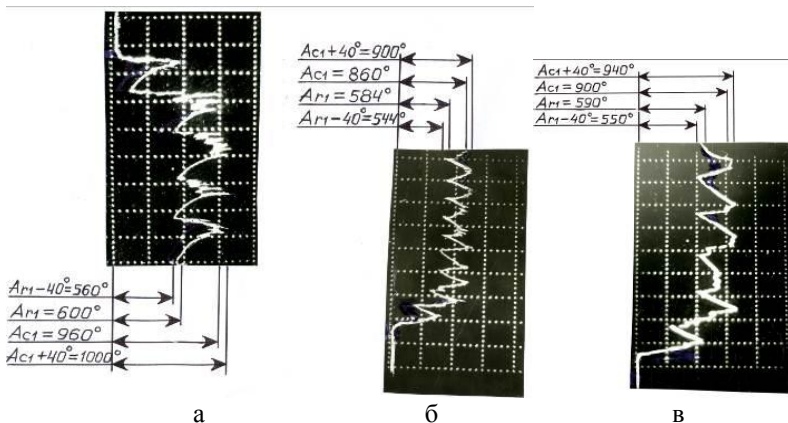


Рисунок 4 – Осциллограммы температур, полученных при шлифовании плоских образцов из стали 45 прерывистым кругом ПП 250x76x25 24А 25 СМ2 К6 с 14 впадинами протяженностью  $l_2=0,0277\text{ м}$  (режущие выступы имеют ту же длину) на режимах:  $V_{кр}=30\text{ м/с}$ ,  $t=6 \cdot 10^{-5}\text{ м}$ ,  $V_{д}=15\text{ м/мин}$  (верхняя осциллограмма),  $V_{д}=25\text{ м/мин}$  (нижняя осциллограмма) [12]

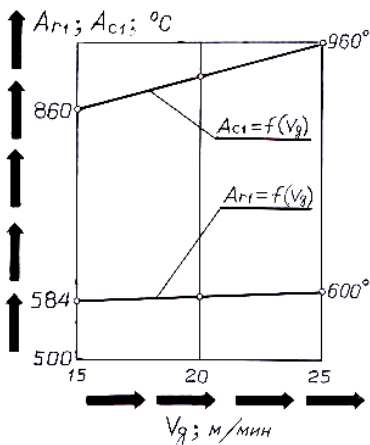


Рисунок 5 – Зависимости критических температур  $A_{c1}$  (перлит-аустенитного) и  $A_{r1}$  (обратного аустенит-перлитного) превращений от скорости перемещения теплового источника  $V_{д}$  для стали 45

## **Выводы**

1. Следует отметить, что скорости нагрева и охлаждения, которые имеют место при прерывистом шлифовании, несопоставимо выше скоростей, которые имеют место при обычной термообработке на измельчение зерна. Для приближения диапазона скоростей нагрева и охлаждения к тем, которые применяются при обычной термообработке, необходимо шлифовать с минимальными скоростями детали.

2. Кроме того, при прерывистом шлифовании обычно наблюдается общее снижение температуры, но металлографические исследования изменения размера зерен не обнаруживают. Предложенная методика нуждается в экспериментальной проверке и уточнении.

**Список использованных источников:** 1. Сметанина Т.С. Особенности формирования структуры аустенита при многократном нагреве в межкритический интервал температур / Т.С. Сметанина, С.А. Коковьякина // Перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве: Сб. тез. докл. Междунар. научн.-практ. конф. – Пермь: ПГТУ. – 2005. – С. 22. 2. Заяц Л.Ц. Повышение прочности низкоуглеродистых мартенситных сталей путем измельчения зерна при аустенизации / Л.Ц. Заяц, М.Г. Закирова, П. Быкова // перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве: Сб. тез. докл. Междунар. научн.-практ. конф. – Пермь: ПГТУ. – 2005. – С. 23-24. 3. Федюкин В.К. Опыт промышленного использования технологии термоциклической обработки металлов / В.К. Федюкин – Л.: ЛДНТП, 1982. – 18 с. 4. Федюкин В.К. Новые способы термоциклической обработки конструкционных сталей / В.К. Федюкин, В.К. Пустовойт – Л.: ЛДНТП, 1973. – 16 с. 5. Федюкин В.К. Закономерности и особенности фазовых превращений при термической обработке и ее влияние на надежность изделий из сталей перлитного класса / В.К. Федюкин – Л.: ЛДНТП, 1974. – 29 с. 6. Федюкин В.К. Метод термоциклической обработки металлов / В.К. Федюкин – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 192 с. 7. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с. 8. Легкостаев Ю.Л. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства стали 12Х2МФ / Ю.Л. Легкостаев, А.О. Соколов, В.Г. Хорошийлов // Вопросы судостроения: Сб. науч. тр. (Серия «Металловедение, металлургия») – Л., 1985. – Вып. 43. – С. 37-42. 9. Илларионов Э.И. О влиянии термоциклической обработки на прочностные свойства стали 30ХГСА / Э.И. Илларионов // термоциклическая обработка металлических изделий: Сб. науч. трудов. – Л., 1982. – С. 71-73. 10. Блантер М.Е. Теория термической обработки / М.Е. Блантер. – М.: Металлургия, 1984. – 315 с. 11. Лебедев В.Г. Кинетика изменения температур критических точек при шлифовании закаливаемых сталей / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко // труды Одесского политехнического университета: науч. и произ.-практ. сб. – Одесса: ОНПУ, 2000. – Вып. 3(12). – С. 42-44. 12. Якимов О.О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчастих коліс при шліфуванні: дис. докт. техн. наук: 05.02.08. Захищена 05.03.2015/ Якімов Олександрович. – Одеса. 2015. – 465 с. 13. Якимов А.А. Термоциклирование при прерывистом шлифовании / А.А. Якимов // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении: тезисы докл. науч.-техн. конф. – Киев: Общество «Знание» Украины. – 1994. – С. 121-122. 14. Усов А.В. Способ шлифования плоских поверхностей / А.В. Усов, А.А. Якимов // А.С. 1683982, СССР. МКИ В 24 В 7/00. – № 4644298/08; Заявл. 31.01.89; Оpubл. 15.10.91, Бюл. №38. – 2 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Smetanina T.S., Kokovjakina S.A. Osobennosti formirovaniya struktury austenita pri mnogokratnom nagreve v mezhkriteskij interval temperatur / Perspektivnye processy i tehnologii v mashinostroitel'nom proizvodstve: Sb. tez. dokl. Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. – Perm': PGTU. – 2005. – S. 22. 2. Zajac L.C., Zakirova M.G., Bykova P. Povyshenie prochnosti nizkouglerodistykh martensitnykh stalej putem izmel'chenija zerna pri austenizacii / Perspektivnye

processy i tehnologii v mashinostroitel'nom proizvodstve: Sb. tez. dokl. Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. – Perm': PGTU. – 2005. – S. 23-24. 3.Fedjukin V.K. Opyt promyshlennogo ispol'zovanija tehnologii termociklicheskoj obrabotki metallov. – L.: LDNTP, 1982. – 18 s. 4. Fedjukin V.K., Pustovojt V.K. Novye sposoby termociklicheskoj obrabotki konstrukcionnyh stalej. – L.: LDNTP, 1973. – 16 s. 5.Fedjukin V.K. Zakonomernosti i osobennosti fazovyh prevrashhenij pri termicheskoj obrabotke i ee vlijanie na nadezhnost' izdelij iz stalej perlitnogo klassa. – L.: LDNTP, 1974. – 29 s. 6.Fedjukin V.K. Metod termociklicheskoj obrabotki metallov. – L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1984. – 192 s. 7. Fedjukin V.K., Smagorinskij M.E. Termociklicheskaja obrabotka metallov i detalej mashin. – L.: Mashinostroenie, 1989. – 255 s. 8. Legkostaev Ju.L., Sokolov A.O., Horoshijlov V.G. Vlijanie termociklicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva stali 12H2MF / Voprosy sudostroenija: Sb. nauch. tr. (Serija «Metallovedenie, metallurgija»). – L., 1985. – Vyp. 43. – S. 37-42. 9.Illarionov Je.I. O vlijanii termociklicheskoj obrabotki na prochnostnye svojstva stali 30HGSA / Ttermociklicheskaja obrabotka metallicheskih izdelij: Sb. nauch. trudov. – L., 1982. – S. 71-73. 10.Blanter M.E. Teorija termicheskoj obrabotki. – M.: Metallurgija, 1984. – 315 s. 11. Lebedev V.G., Klimenko N.N. Kinetika izmenenija temperatur kriticheskikh toчек pri shlifovanii zakalivaemyh stalej /Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta: nauch. i proiz.-prakt. sb. – Odessa: ONPU, 2000. – Vyp. 3(12). – S. 42-44. 12. Tehnologichne zabezpechennja jakosti poverhnevnogo шарu zubiv visokotochnih zubchastih kolis pri shlifuvanni: dis. dokt. tehn. nauk: 05.02.08. Zahishhena 05.03.2015/ Jakimov Olexsij Olexsandrovich. – Odesa. 2015. – 465 s. 13.Jakimov A.A. Termociklirovanie pri preryvistom shlifovanii / Resurso- i jenergosberegajushhie tehnologii v mashinostroenii: tezisy dokl. nauch.-tehn. konf. – Kiev: Obshhestvo «Znanie» Ukrainy. – 1994. – S. 121-122. 14. Usov A.V., Jakimov A.A. Sposob shlifovanija ploskih poverhnostej / A.S. 1683982, SSSR. MKI V 24 V 7/00. – № 4644298/08; Zajavl. 31.01.89; Opubl. 15.10.91, Bjul. №38. – 2 s.