

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, прошлифованої переривчастим кругом.

Ключові слова: температура шліфування, термоциклірування, переривчастий шліфувальний круг

В статье рассмотрены предполагаемые закономерности изменения размеров зерен металла в поверхностном слое детали, прошлифованной 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).

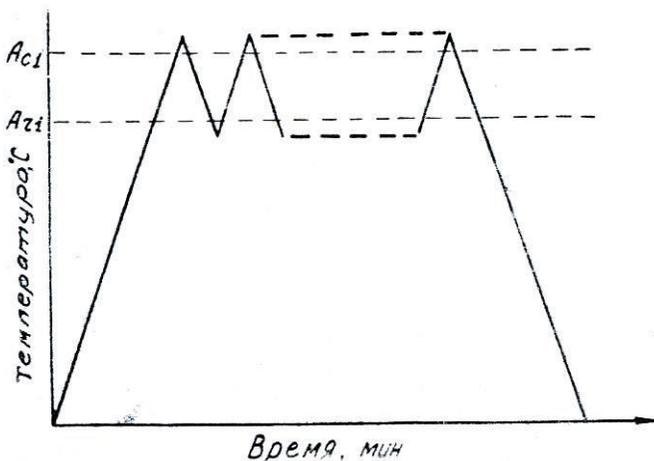


Рисунок 1 – Схема режима маятниковой термоциклической обработки

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].

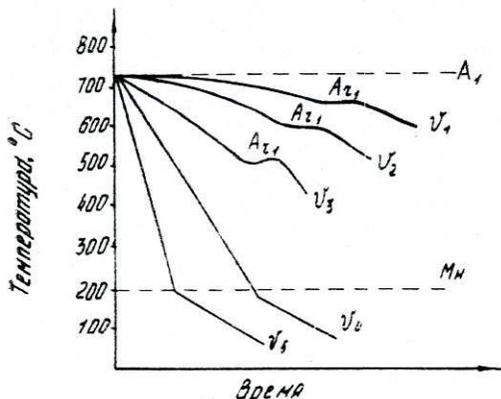


Рисунок 2 – Кривые охлаждения стали: $V_1 < V_2 < V_3 < V_4 < V_5$

В работе [12] получена формула (1), позволяющая рассчитывать усредненную температуру на обработанной поверхности, возникающую от срезания металла разным числом режущих выступов прерывистого круга:

$$T_K = \frac{2 \cdot \psi \cdot q}{\sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot \sum_{i=1}^k \left[\sqrt{(k-i+1) \cdot \frac{l_2}{l_1} + (k-i) \cdot \frac{l_2}{V_{кр}}} \right] \times$$

$$\times \operatorname{erfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{(k-i+1) \cdot \frac{l_1}{V_{кр}} + (k-i) \cdot \frac{l_2}{V_{кр}}}} \right) -$$

$$- \sqrt{(k-i) \cdot \frac{(l_1 + l_2)}{V_{кр}}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{(k-i) \cdot \frac{(l_1 + l_2)}{V_{кр}}}} \right) \quad , (1)$$

где ψ – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в тепло;

q – интенсивность теплового потока, Вт/м², $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{\sqrt{D_{кр}} \cdot t \cdot B}$;

$V_{кр}$ – окружная скорость шлифовального круга, м/с;

$D_{кр}$ – диаметр шлифовального круга, м;

t – глубина резания, м;

B – ширина шлифования, м;

ρ , λ , c – плотность (кг/м³), 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;

α – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/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.

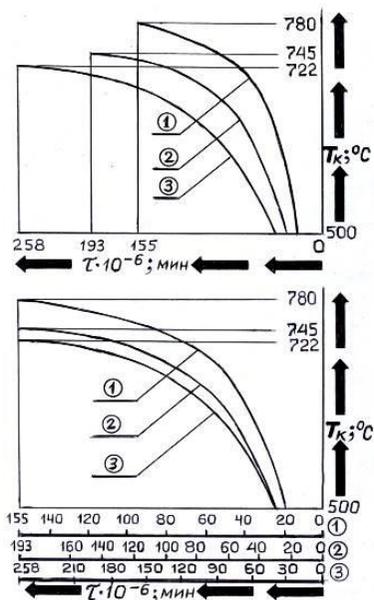


Рисунок 3 – Расчетные поверхностные температуры, формируемые при шлифовании плоских образцов из стали 45 прерывистым кругом ($l_1 = l_2 = 0,0277$ м, $n=14$) на режимах: $V_{кр}=30$ м/с, $t=6 \cdot 10^{-5}$ м, $V_{д}=15$ м/мин (режим №3), $V_{д}=20$ м/мин (режим №2), $V_{д}=25$ м/мин (режим №1)

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

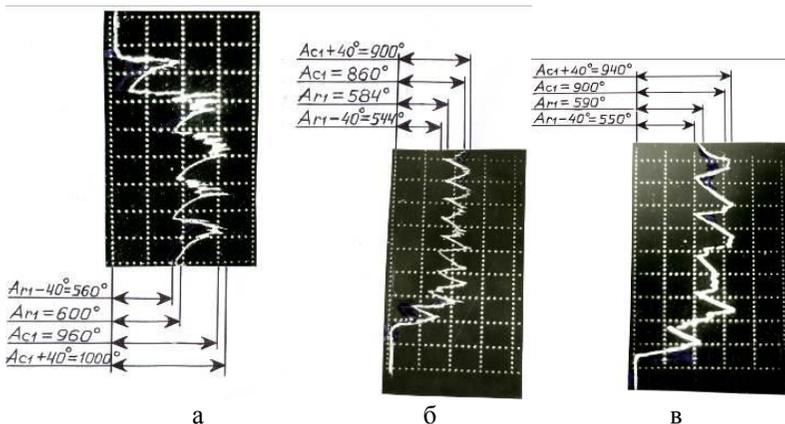


Рисунок 4 – Осциллограммы температур, полученных при шлифовании плоских образцов из стали 45 прерывистым кругом ПП 250x76x25 24А 25 СМ2 К6 с 14 впадинами протяженностью $l_2=0,0277\text{ м}$ (режущие выступы имеют ту же длину) на режимах: $V_{кр}=30\text{ м/с}$, $t=6\cdot 10^{-5}\text{ м}$, $V_{д}=15\text{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

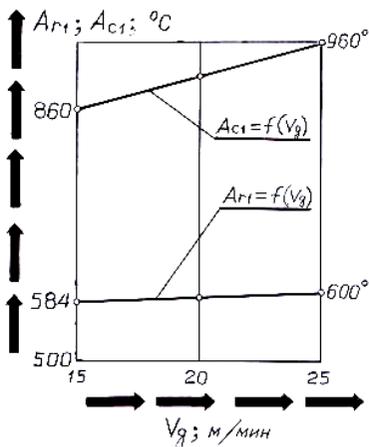


Рисунок 5 – Зависимости критических температур A_{c1} (перлит-аустенитного) и A_{r1} (обратного аустенит-перлитного) превращений от скорости перемещения теплового источника $V_{д}$ для стали 45

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. Хорошилов // 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. Osobnosti 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.