

УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Дейнеко Л. М., Кобаско Н. И.

Объектом исследования являются структура и механические свойства стали в центральных точках закаленных изделий. В работе разработана методика, основанная на сравнении скорости охлаждения в центральной области изделия со скоростью охлаждения пробного образца диаметром 5–6 мм, исследуемые в лабораторных условиях. К этому времени такой подход был невозможен, поскольку не были решены две основные проблемы. Переход от малого образца к реальному изделию при закалке был научно необоснованным в связи с большой сложностью проблемы. Не были известны математические зависимости для расчета скорости охлаждения при закалке изделий произвольной формы в жидкостях. В последнее время эти проблемы решены и появилась сталь оптимальной прокаливаемости, которую можно очень быстро охладить. Это упростило решение данной проблемы. Разработанная в работе методика помогает закалять металлические изделия таким образом, чтобы на поверхности были большие сжимающие остаточные напряжения, а в середине бейнитная структура высокой прочности и повышенной вязкости. Это позволяет увеличивать ресурс работы закаленных изделий, уменьшать проценты легирующих элементов, а также соблюдать чистую экологию. В связи с этим, основываясь на достижениях науки в последние десятилетия, предложена методика прогнозирования структуры и механических свойств стали при закалке реальных деталей. Эта методика может быть использована для увеличения долговечности работы деталей машин и инструмента. В работе также отмечается перспективность использования водных растворов полимеров низкой концентрации для интенсивной закалки стальных изделий. В этом случае при моделировании скорости охлаждения в процессе закалки реальных изделий пробные образцы закалывают в водных растворах этих же полимеров повышенной концентрации с целью образования стабильной паровой пленки. Стабильная паровая пленка обеспечивает стабильный коэффициент теплоотдачи. Это увеличивает точность моделирования и расширяет возможности предложенной методики расчетов.

Ключевые слова: метод моделирования формирования структуры, бейнитные и мартенситные превращения, термическая обработка, высокая прочность.

1. Введение

Главная идея данной работы состоит в том, чтобы объединить достижения в областях бейнитных и мартенситных превращений на основе эффективного

контроля фазовых превращений в сердцевине закаливаемых изделий. Большие достижения получены при упрочнении проката, где основной упор направлен на достижение высокопрочной и пластичной бейнитной структуры [1, 2]. В настоящее время особое внимание уделяют бейнитным превращениям, так как бейнитная структура обеспечивает более высокие прочностные и пластические свойства материала, нежели это может обеспечить мартенситная структура материала [3]. При обсуждении этой важной проблемы с автором работы [3] выяснилось, что для получения бейнитной структуры необходимо применять быстрое охлаждение, чтобы миновать перлитные превращения. Как правило, при быстром охлаждении на поверхности закаливаемых изделий сразу же возникает мартенсит вместо бейнита. Поэтому в большинстве случаев для получения вязкой бейнитной структуры осуществляют дорогую изотермическую закалку в ваннах при температуре, равной или больше температуры начала мартенситного превращения M_n . В этом случае используют легированные и высоколегированные стали. Бейнитную структуру по всему сечению изделия в условиях быстрого охлаждения можно получить, осуществляя закалку сталей в жидких средах под давлением [4]. Но такой процесс дорогостоящий и требует изготовления специального оборудования. Эта проблема легко решается путем объединения обоих направлений. Как известно, при закалке сталей пониженной прокаливаемости на поверхности изделий возникает тонкий слой мартенсита, в то время как сердцевина остается вязкой, состоящей из бейнита и перлита [5–7]. Это приводит к созданию сжимающих напряжений на поверхности закаленных деталей [8, 9]. Более того, авторами работ [10–12] путем компьютерного моделирования было показано, что интенсивная закалка создает высокие сжимающие напряжения на поверхности изделий и сверхупрочняет материал. Очень важные эксперименты авторов работ [13–15] подтвердили это. Это приводит к существенной экономии легирующих элементов. Поэтому в исследованиях [16, 17] была разработана сталь оптимальной прокаливаемости и предложена закалочная среда для ее упрочнения, представляющая собой 1 % водный раствор полимера обратной растворимости. Эти достижения обсуждались на международном уровне в ведущих журналах по физике [18, 19].

При выборе режима охлаждения металлических изделий при реализации упрочняющей термической обработки традиционно руководствуются следующими основными критериями, обуславливающими выбор охлаждающей среды:

- требованием отсутствия любой паровой пленки в процессе закалки, что создает равномерное и интенсивное охлаждение стальных изделий [10].

- экономической целесообразностью внедрения выбранной разработки, что обусловлено в первую очередь стоимостью охлаждающей среды и ее эксплуатации;

- технологичностью охлаждающей среды, что определяется следующими основными параметрами: температурой эксплуатации; приемлемой концентрацией компонентов (для различных водных охлаждающих сред); возможностью осуществлять контроль охлаждающей способности среды;

– экологической безопасностью охлаждающей среды при ее подготовке, эксплуатации и утилизации;

– пожарной безопасностью при хранении и эксплуатации.

Повышение степени легированности металла или применение дополнительных технологий поверхностного упрочнения рабочих поверхностей металлоизделий (дополнительно к традиционным видам термообработки) существенно повышает стоимость и усложняет технологию их изготовления. Экономия металла стала возможным благодаря открытию явления сверхупрочнения стали при интенсивной закалке [17, 18]. А также доказано формирование высоких сжимающих остаточных напряжений на поверхности термоупрочняемых изделий [19, 20].

Для контроля микроструктуры и механических свойств стали в центре закаленных изделий приходится разрезать закаленную деталь и изготавливать тестовые образцы из сердцевины материала. Это очень дорогостоящая и кропотливая работа. Поэтому актуальным является точное прогнозирование структуры и механических свойств в центре закаленных изделий. Многолетние исследования авторов [3, 17, 20] создали основу для осуществления таких прогнозов. Таким образом, *объектом исследования* являются структура и механические свойства стали в центральных точках закаленных изделий. Цель данной работы заключается в разработке методики моделирования процессов фазовых превращений в центре закаливаемых крупных изделий в лабораторных условиях.

2. Методы исследования

В ходе исследования использовались образцы диаметром 5–6 мм, которые охлаждают в лаборатории со скоростью равной скорости охлаждения в центре крупных изделий при закалке.

В данной работе обсуждаются исследования, применительно к технологиям упрочняющей термической обработки различных металлоизделий, в которых в качестве закалочной среды используется вода или водные растворы полимеров очень низкой концентрации. Для оптимизации предложенного подхода авторы предлагают новую упрощенную методику исследования влияния интенсивности охлаждения в условиях упрочняющей термической обработки на механические свойства стальных изделий. Суть новой методики излагается ниже.

3. Результаты исследования и их обсуждение

3.1. Упрощенная методика прогнозирования механических свойств материала в сердцевине закаливаемых изделий

Для прогнозирования прочностных свойств материала в сердцевине больших изделий следует создать условия охлаждения пробных образцов, равным условиям охлаждения сердцевины изделий. Достаточно рассчитать скорость охлаждения сердцевины больших изделий и скорость охлаждения опытных образцов и создать условия для их равенства.

В основе предложенных расчетов лежит теория теплопроводности и теория регулярного теплового режима [21, 22].

Для проведения таких расчетов в табл. 1–3 приведены теплофизические свойства меди, серебра и переохлажденного аустенита, которые используются в данной работе.

Таблица 1

Теплопроводность λ переохлажденного аустенита в зависимости от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Текущее значение λ , Вт/мК	17.5	18	19.6	21	23	24.8	26.3	27.8	29.3
Среднее значение $\bar{\lambda}$, Вт/мК	17.5	17.75	18.55	19.25	20.25	21.15	21.90	22.65	23.4

Таблица 2

Теплопроводность λ меди и серебра в зависимости от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	0	100	200	400	600	800	900
Медь, Вт/мК	393.1	384.9	380	365	353.5	340.8	333
Серебро, Вт/мК	410.5	392	372	362	374.5	–	–

Таблица 3

Температуропроводность переохлажденного аустенита в зависимости от температуры материала

$T, ^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$a \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	4.55	4.63	4.70	4.95	5.34	5.65	5.83	6.19	6.55
$\bar{a} \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	4.55	4.59	4.625	4.75	4.95	5.10	5.19	5.37	5.55

Для вычисления скорости охлаждения пробных образцов и реальных деталей будем использовать обобщенную зависимость (1), которая справедлива для любых размеров и форм изделий [11, 21, 22]:

$$v = \frac{aKn}{K}(T - T_m), \quad (1)$$

где v – скорость охлаждения; a – коэффициент температуропроводности стали; Kn – число Кондратьева; K – коэффициент формы Кондратьева в м^2 ; T – текущая температура; T_m – температура закалочной ванны.

Поскольку процесс охлаждения необходимо прерывать, ниже приведена также обобщенная зависимость (2) для расчета времени охлаждения изделий различной конфигурации в различных условиях теплообмена [11, 12]:

$$\tau = \left[\frac{kBi_v}{2.095 + 3.867Bi_v} + \ln \frac{T_0 - T_m}{T - T_m} \right] \frac{K}{aKn}, \quad (2)$$

где

$$Bi_V = \frac{\alpha}{\lambda} K \frac{S}{V},$$

где τ – время охлаждения в сек; Bi_V – безразмерное обобщенное число Био; $k=1, 2, 3$ – коэффициенты для тел пластинчатой, цилиндрической и шарообразной формы; α – коэффициент теплоотдачи; λ – теплопроводность стали; S – поверхность; V – объем.

$$Kn = \frac{Bi_V}{(Bi_V^2 + 1.437Bi_V + 1)^{0.5}}. \quad (3)$$

Автор работы [20] предложил критерий интенсивного охлаждения (4), при котором отсутствует как пленочное кипение, так и нестационарное пузырьковое кипение при закалке в жидких средах:

$$Bi = \frac{2(\vartheta_o - \vartheta_l)}{\vartheta_l + \vartheta_{uh}}, \quad (4)$$

где

$$\vartheta_l = \frac{1}{\beta} \left[\frac{2\lambda(\vartheta_o - \vartheta_l)}{R} \right]^{0.3}, \quad (5)$$

где $\vartheta_l = T_l - T_s$; $\vartheta_o = T_o - T_s$; $\beta = 3.41$; R – радиус; T_l – температура поверхности вначале пузырькового кипения; T_o – начальная температура; T_s – температура насыщения.

При закалке листового проката могут быть использованы хорошо известные данные о влиянии давления в спреере на интенсивность конвективного теплообмена (рис. 1) [23].

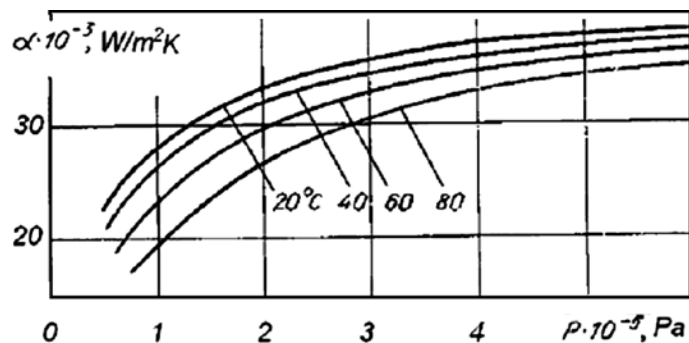


Рис. 1. Конвективный коэффициент теплоотдачи в зависимости от давления в спреере для воды при температурах 20 °C, 40 °C, 60 °C и 80 °C [23]

Рассмотрим скорость охлаждения листового проката толщиной 20 мм. Для этого сначала определяем величину g_l :

$$g_l = \frac{1}{3.41} \left[\frac{2 \cdot 23(760 - g_l)}{0.01} \right]^{0.3} = 27 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Затем определяем критерий прямого конвективного теплообмена Bi при закалке листа толщиной 20 мм:

$$Bi = \frac{2(g_o - g_l)}{g_l + g_{uh}} = \frac{2 \cdot (760 - 27)}{(27 + 80)} = 14.$$

Согласно этому критерию, пленочное и пузырьковое кипение будет отсутствовать, если конвективный коэффициент теплоотдачи равен $32000 \text{ W/m}^2\text{K}$:

$$\alpha = \frac{\lambda Bi}{R} = \frac{23 \cdot 14}{0.01} = 32200 \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Имея эти данные, определяем обобщенное число Био и число Кондратьева, которые равны:

$$Bi_v = 0.346 Bi = 0.346 \cdot 14 = 4.83;$$

$$Kn = 0.86.$$

Скорость охлаждения сердцевины листа при $700 \text{ } ^\circ\text{C}$ толщиной 20 мм равна:

$$v = \frac{aKn}{K} (T - T_m) = \frac{5.37 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \cdot 0.86}{40.52 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} (680^\circ\text{C}) = 78 \text{ } ^\circ\text{C/с}.$$

Теперь выясним скорость охлаждения маленького опытного образца при его закалке в различных средах.

При закалке в масле со средним коэффициентом теплоотдачи $1000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, скорость охлаждения вычисляется аналогично:

$$Bi = \frac{1000 \text{ Вт/м}^2\text{К} \cdot 0.003 \text{ м}}{23 \text{ Вт/мК}} = 0.13;$$

$$Bi_v = 0.4053 \cdot 0.13 = 0.053; \quad Kn = 0.05;$$

$$K = 1.56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$v = \frac{aKn}{K} (T - T_m) = \frac{5.19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \cdot 0.05}{1.56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \cdot 640 \text{ } ^\circ\text{C} = 106 \text{ } ^\circ\text{C/с}.$$

При закалке опытного образца 6 мм в диаметре в горячей воде при температуре 60 °С, имеющей коэффициент теплоотдачи 750 Вт/м²К:

$$Bi = \frac{750 \text{ Вт/м}^2\text{К} \cdot 0.003 \text{ м}}{23 \text{ Вт/мК}} = 0.0975;$$

$$Bi_v = 0.4053 \cdot 0.0975 = 0.0395; \quad Kn = 0.0388;$$

$$v = \frac{aKn}{K}(T - T_m) = \frac{5.19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \cdot 0.0388}{1.56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \cdot 610 \text{ °С} = 79 \text{ °С/с}.$$

Согласно предлагаемой методике, это означает, что сердцевина листа имеет такие же механические свойства, как опытный образец 6 мм после закалки в воде при 60 °С.

Для облегчения аналогичных расчетов применительно к полуосям грузовиков в табл. 4, 5 приведены сопоставимые скорости охлаждения полуосей и опытных образцов.

Таблица 4

Скорость охлаждения сердцевины полуосей в зависимости от их размеров и условий теплообмена

Диаметр, мм	$K, \text{ м}^2$	Скорость охлаждения в °С/с при $Kn=0.8$	Скорость охлаждения в °С/с при $Kn=1$
48	$99.6 \cdot 10^{-6}$	28	35
50	$108.1 \cdot 10^{-6}$	25.7	32.2
52	$116.9 \cdot 10^{-6}$	24	30
60	$155.6 \cdot 10^{-6}$	18	22.3
62	$166.2 \cdot 10^{-6}$	16	20.3

Таблица 5

Скорость охлаждения цилиндрических опытных образцов диаметром 6 мм в зависимости от величины коэффициента теплоотдачи

$\alpha, \text{ Вт/м}^2\text{К}$	Kn	Скорость охлаждения в °С/с (700 °С)
200	0.0092	20
300	0.0139	31
400	0.018	40
500	0.023	51
600	0.027	60
700	0.029	63
1000	0.041	100
2000	0.092	204

Следует заметить, что наряду с улучшением механических свойств сердцевины полуосей автомобилей, на их поверхности возникают высокие

сжимающие напряжения, увеличивающие ресурс работы полуосей. Некоторые экспериментальные данные приведены в табл. 6.

Таблица 6

Остаточные окружные сжимающие напряжения в МПа на поверхности разных изделий после их интенсивной закалки [11]

№ п/п	Изделие	Окружные сжимающие напряжения в МПа на поверхности интенсивно закаленных изделий
1	Ролики подшипников толщиной 75 мм, изготовленные из стали ШХ15 (52100)	-840
2	Цилиндрические образцы толщиной 72.9 мм, изготовленные из стали 1547	-626
3	Шкворни толщиной 40 мм, изготовленные из стали 4140	-563

Таким образом, механические свойства сердцевины интенсивно охлаждаемого листа 20 мм толщиной соответствуют механическим свойствам цилиндрического образца 6 мм в диаметре, закаленного в горячей воде с коэффициентом теплоотдачи $750 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Для моделирования процесса охлаждения сердцевины полуосей требуется охлаждение опытных образцов при меньших коэффициентах теплоотдачи.

Следует также отметить, что весьма некорректным и ошибочным является попытка использовать коэффициентов теплоотдачи, полученные при испытании серебряного шарика 20 мм диаметром, на любые стальные образцы. Теплопроводность серебра в 20 раз превышает теплопроводность стали, а это означает, что серебро будет иметь более развитую паровую пленку и другой коэффициент теплоотдачи по сравнению со сталью.

3.2. Прогнозирование механических свойств в сердцевине больших изделий путем закалки и испытания в лабораторных условиях малых пробных образцов

Прогнозирование структуры стали и ее твердости в центральных точках изделий можно осуществлять, используя метод Джомини, который многократно обсуждался в литературе [24–26]. Предлагаем более простую методику прогнозирования, которая заключается в сопоставлении скоростей охлаждения, полученных при испытании малых образцов в горячей воде и выполненных расчетов по вычислению скорости охлаждения сердцевины реальной детали при ее закалке в реальных условиях.

Из технической литературы известно, что охлаждающая способность воды существенно зависит от ее температуры в процессе закалочного охлаждения деталей. Результаты опытов [27], проведенные на серебряном шарике 20 мм в

диаметре, представлены на рис. 2.

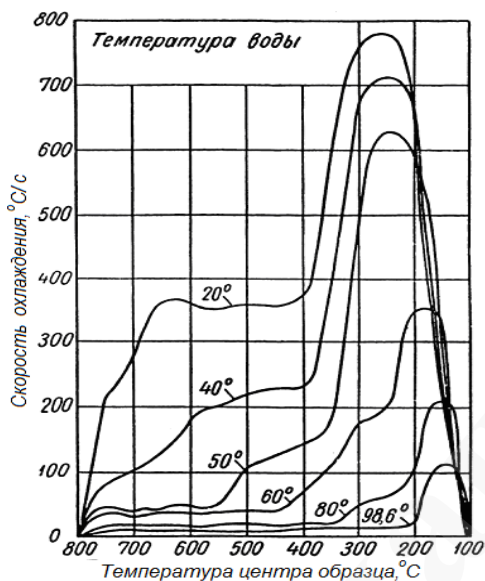


Рис. 2. Кривые изменения скорости охлаждения серебряного шарика 20 мм в диаметре при его охлаждении в воде с различной температурой в зависимости от температуры центра термозонда [27]

В работе [28] исследовано равномерность охлаждения стальной полосы с температуры 800 °C по значениям предела прочности по ее толщине в зависимости от температуры воды. На рис. 3 цифры у кривых показывают температуру воды в °C.

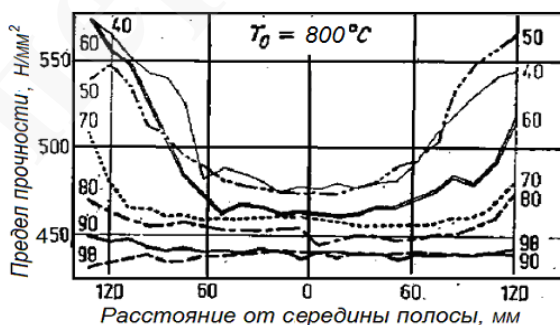


Рис. 3. Равномерность охлаждения металла с температуры 800 °C по значениям предела прочности по ширине стальной полосы в зависимости от температуры закалочной среды [28]

Это чрезвычайно дорогостоящая и кропотливая работа, занимающая длительное время, измеряя по всему сечению стальной полосы механические свойства материалов. Поэтому предлагаем обратную процедуру. Путем закалки цилиндрических образцов 6 мм в диаметре в различных закалочных средах и измерений их скорости охлаждения, а также их механических испытаний, можно восстановить распределение прочности в стальной полосе, используя предложенную методику упрощенных расчетов. Более подробная информация о закале сталей в жидких средах, с учетом современных математических

моделей, обсуждается в работе [29]. При расчетах могут быть использованы эксперименты, проведенные на цилиндрических образцах диаметром 6 мм, которые представлены на рис. 4 и в табл. 7. Также могут быть использованы исследования [26, 27, 30].

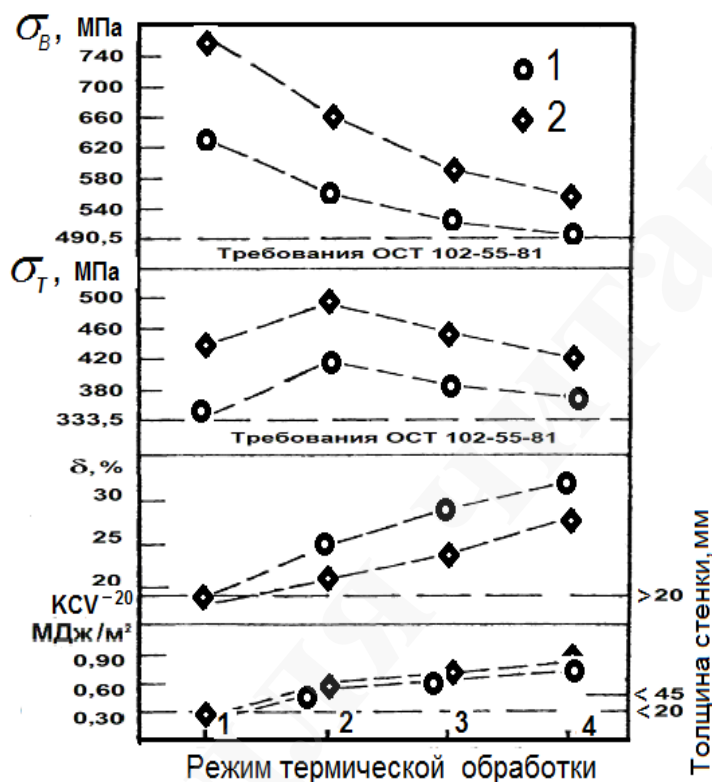


Рис. 4. Механические свойства стали 15XCHD в зависимости от режима термической обработки и марочного химического состава: 1 – плавка имеет марочный химический состав по концентрации углерода, близкий к нижнему; 2 – плавка имеет марочный химический состав по концентрации углерода, близкий к среднему; Режим 1 – упрочняющая объемная термическая обработка (ТУ) с температуры аустенитизации 980 °С в воде ($T_B > 90$ °С) по режиму полного охлаждения металла до температуры среды; Режимы 2, 3, 4 – ТУ + отпуск 30 мин. при 500, 600, 700 °С, соответственно

На рис. 4 приняты следующие обозначения: σ_b – предел прочности при растяжении, МПа; σ_t – предел текучести, МПа; δ – относительное удлинение, %; KCV^{-20} – ударная вязкость, определенная при испытании образцов Шарпи (с концентратором V) при температуре минус 20 °С, МДж/м².

Для реализации предлагаемой методики использованы экспериментальные данные по испытанию механических свойств стали и ее тонкой структуры после закалки малых образцов в горячей воде (рис. 4, табл. 7). Как видно из рис. 4, даже в пределах одной и той же марки стали, механические свойства стали сильно различаются, чего не учитывает метод Джомини. Кроме того, известный метод не оперирует такими понятиями, как пластические свойства материала, уровень микродеформаций и плотность дислокаций (рис. 4, табл. 7). Предлагаемая методика позволяет переносить полученные исследования на

реальные детали, в которых скорость охлаждения в процессе закалки такая же, как скорость охлаждения малых образцов.

Таблица 7

Влияние интенсивности охлаждения малоуглеродистой низколегированной стали 09Г2С ($\delta=8$ мм) в низкотемпературной области на уровень дефектности кристаллической решетки и микродеформаций

№ п/п	Режим обработки металла	Уровень микродеформаций, $L, \times 10^{-4}$	Плотность дислокаций, $\rho, \text{см}^{-2} \times 10^{10}$
1	Термическое упрочнение (ТУ) в горячей воде до полного охлаждения металла	5.6/5.1	3.4/3.0
2	ТУ в горячей воде с прерыванием охлаждения при температуре металла ≈ 250 °С	1.1/4.3	2.6/2.1
3	ТУ в горячей воде с прерыванием охлаждения при температуре металла ≈ 350 °С	0.8/3.6	1.9/1.2
4	Закалка в масле (+40 °С)	6.1	5.04
5	Закалка в воде (+20 °С)	24.6	1.01×10^{11}

Примечание: в числителе приведены значения величин для термоупрочненного металла, а в знаменателе – после термоупрочнения и последующего отпуска 500 °С

В последние десятилетия в практике термической обработки активно используются в качестве охлаждающих сред водные растворы полимеров. Результаты исследований последних лет показывают перспективность применения водных растворов с низкой концентрацией полимеров, обеспечивающих при закалке интенсивное и равномерное охлаждение различных стальных металлоизделий [18, 19].

Дополнительная информация, касающаяся равномерного охлаждения и прогнозирования структуры и механических свойств материала в объеме термоупрочненных изделий, представлена в работах [18, 19].

Алгоритм разработанной методики продемонстрирован на примере интенсивной закалки стальных изделий кольцевидной формы (рис. 5). Предположим, что на предприятии указанные изделия охлаждаются водными струями (рис. 1) в условиях $Bi \rightarrow \infty$.

В табл. 8 представлены скорости охлаждения изделий кольцевидной формы при температуре 700 °С в зависимости от размеров изделий, которые закаливают в условиях $Bi \rightarrow \infty$. Предположим, что нужно изучить структуру и померять механические свойства в центре большого кольца, которое имеет следующие размеры: внешний диаметр $D_2=0.1$ м, внутренний диаметр $D_1=0.02$ м и высота кольца равна 0.04 м (табл. 8). Скорость охлаждения в центре такого кольца при температуре 700 °С равна 42 °С/с.

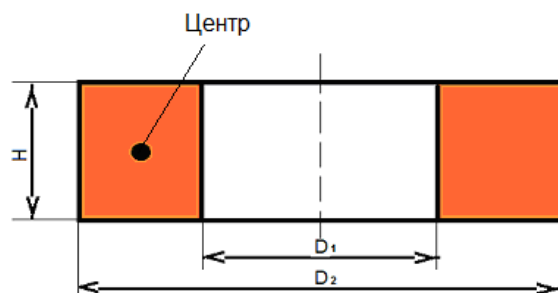


Рис. 5. Эскиз изделий кольцевидной формы, выбранных для прогнозирования механических свойств и структуры в центральных точках

Таблица 8

Скорость охлаждения в центре изделий кольцевой формы в зависимости от размеров колец

D_1	D_2	H	$K \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$	$v, \text{ }^\circ\text{C/s}$
0.02	0.06	0.02	20.6	172
0.02	0.08	0.03	46.6	76
0.02	0.10	0.04	83.4	42

Аналогично, в табл. 9 представлены скорости охлаждения малых опытных образцов на разрыв в зависимости от их размеров и условий охлаждения, то есть коэффициента теплоотдачи. Сопоставляя табл. 8 и табл. 9, нужно найти равные скорости охлаждения и таким образом выяснить, каков должен быть малый образец для тестирования и в каких условиях его нужно охлаждать. Для рассматриваемого случая подходит малый образец диаметром 5 мм, который нужно охлаждать при коэффициенте $300 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (табл. 9).

Таблица 9

Скорость охлаждения опытных образцов для испытания на прочность в зависимости от их размеров и коэффициентов теплоотдачи

$\alpha, \text{ Вт/м}^2\text{К}$	150	300	400	500	1000
$v, \text{ }^\circ\text{C/s}$. Образец 10 мм	6	12	16	21	42
$v, \text{ }^\circ\text{C/s}$. Образец 6 мм	16	32	44	59	118
$v, \text{ }^\circ\text{C/s}$. Образец 5 мм	23	46	63	85	170

Предложенная методика по сравнению с методом Джомини является более простой и позволяет получить более широкую и более важную информацию об испытываемой стали (рис. 4, табл. 7).

Данная работа продолжает развитие метода прогнозирования структуры и механических свойств стали в сердцевине закаленных изделий в более упрощенном варианте, который был изложен в [26]. Особенно этот метод очень важен при использовании стали оптимальной прокаливаемости и метод ее выбора в зависимости от формы и размеров закаливаемых изделий, которые были

запатентованы в [16]. Как правило, такая сталь подвергается интенсивной закалке, которая предусматривает создание высоких сжимающих напряжений в поверхностном мартенситном слое и более мягкую сердцевину, состоящую из смеси перлита и бейнита или чистого бейнита повышенной прочности и пластичности [16, 17]. В связи с этим важно иметь простую и легко реализуемую методику исследования механических свойств сердцевины закаленных изделий, не прибегая к их разрушению.

В настоящее время уже имеются готовые наработки для широкомасштабного внедрения интенсивных технологий и сталей оптимальной прокаливаемости в мировую практику на базе существующего оборудования или несложного нового оборудования. В качестве закалочной среды запланировано использование низкие концентрации водных растворов полимеров обратной растворимости. Работниками фирмы «Интенсивные Технологии ЛТД» (ИТЛ, г. Киев, Украина) разработаны компьютерные программы для расчета режимов охлаждения в закалочных средах деталей различной конфигурации и размеров. А также предложена закалочная среда для интенсивной закалки на основе водных растворов полиакриламида очень низкой концентрации (0.001–0.005 %) [31, 32].

Нужно иметь ввиду, что предложенная методика расчетов является весьма приближенной. На современном уровне при расчете температурных полей и скоростей охлаждения необходимо решать гиперболическое уравнение теплопроводности и использовать компьютерное моделирование [33, 34]. Важно также использовать современные методы тестирования закалочных сред [35–37]. Все это должно быть учтено при дальнейших исследованиях.

4. Выводы

В работе предложена простая методика моделирования формирования структуры и механических свойств материала в сердцевине различных стальных изделий при их закалке в жидких средах. Суть методики заключается в том, что сначала осуществляют расчет скорости охлаждения сердцевины закаливаемых изделий при температурах 700 °С и 300 °С. Затем осуществляют расчет скорости охлаждения маленьких образцов толщиной 5–6 мм, которые охлаждают в условиях, где для малых пробных образцов достигаются аналогичные скорости охлаждения при температурах 700 °С и 300 °С. Также предложено объединить достижения в области бейнитных и мартенситных превращений при закалке с целью максимального упрочнения закаливаемых изделий.

Благодарность

Посвящается 116-й годовщине со дня рождения академика К. Ф. Стародубова.

Литература

1. Starodubov, K. F., Uzlov, I. G., Savenkov, V. Ia. et. al. (1970). *Termicheskoe Uprochnenie Prokata*. Dnepropetrovsk: Metallurgiiia, 368.
2. Deineko, L. N., Bolshakov, V. I. (2000). *Termicheskoe uprochnenie soedinitelnykh detalei magistralnykh neftegazoprovodov*. Dnepropetrovsk, 120.

3. Bhadeshia, H. K. D. H. (2015). *Bainite in Steels: Theory and Practice*. Money Publishing, 616.
4. Liscic, B., Tensi, H., Canale, L., Totten, G. (Eds.) (2010). *Quenching Theory and Technology*. CRC Press, 725. doi: <http://doi.org/10.1201/9781420009163>
5. Shepeliakovskii, K. Z. (1972). *Uprochnenie detalei mashin poverkhnostnoi zakalkoi TVCH*. Moscow: Mashinostroenie, 288.
6. Shepelyakovskii, K. Z., Ushakov, B. K. (1990). Induction surface hardening—progressive technology of XX and XXI centuries. *Proc. 7th Int. Congress on Heat treatment and technology of surface coatings*, 33–40.
7. Ouchakov, B., Shepeljakovskii, K. (1998). *New Steels and Methods for Induction Hardening of Bearing Rings and Rollers*. Bearing Steels: Into the 21st Century, 307. doi: <http://doi.org/10.1520/stp12136s>
8. Shepelyakovskii, K. Z., Bezmenov, F. V. (1998). New Induction Hardening Technology. *Advanced Materials & Processes*, 154 (4), 225–227.
9. Ushakov, B. K., Efremov, V. N., Kolodjagny, V. V., Skryagin, V. I., Dub, L. G. (1991). New Compositions of Bearing Steels of Controlled Hardenability. *Stal*, 10, 62–65.
10. Liscic, B., Tenzi, H. M., Luty, W. (1992). *Theory and Technology of Quenching*. Berlin, New York: Springer-Verlag, 534. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-662-01596-4>
11. Kobasko, N. I., Aronov, M. A., Powell, J. A., Totten, G. E. (2010). *Intensive Quenching Systems: Engineering and Design*. ASTM International, 234. doi: <http://doi.org/10.1520/mnl64-eb>
12. Kobasko, N. (2017). A method for optimizing chemical composition of steels to reduce radically their alloy elements and increase service life of machine components. *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 3–12. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00253>
13. Rath, J., Lübben, T., Hunkel, M., Hoffmann, F., Zoch, H.-W. (2009). Grundlegende Untersuchungen zur Erzeugung von Druckeigenspannungen durch Hochgeschwindigkeits-Abschrecken. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 64 (6), 338–350. doi: <http://doi.org/10.3139/105.110037>
14. Rath, J., Lübben, T., Hoffmann, F., Zoch, H.-W. (2010). Generation of compressive residual stresses by high speed water quenching. *International Heat Treatment and Surface Engineering*, 4 (4), 156–159. doi: <http://doi.org/10.1179/174951410x12851626812970>
15. Zoch, H. W., Schneider, R., Lübben, T. (2014). *Proc. of European Conference on Heat Treatment and 21st IFHTSE Congress*. Munich, 566
16. Kobasko, N. (2013). Pat. No. 114174 UA. *Alloyed Low Hardenability Steel and Method of its Composing*. MPK: C22C 38/40, C22C 38/08, C21D 1/18, C22C 38/24, C22C 38/46, C21D 9/00, C22C 38/12. No. a 2013 11311. declared: 23.09.2013; published: 10.05.2017, Bul. No. 9.
17. Kobasko, N. (2018). *Optimal Hardenability Steel and Method for Its Composing*. Lambert Academic Publishing, 122.
18. Kobasko, N. I. (2019). Uniform and Intense Cooling During Hardening Steel in Low Concentration of Water Polymer Solutions. *American Journal of Modern Physics*, 8 (6), 76–85.
19. Kobasko, N. I. (2020). Mechanism of Film Boiling Elimination and IQ Process Design for Hardening Steel in Low Concentration of Water Polymer Solutions. *Global Journal of Science Frontier Research*, 20 (7), 39–56. doi: <http://doi.org/10.34257/gjsfravol20is7pg39>

20. Pat. No. 6,364,974 B2 US (2002). *Quenching apparatus and method for hardening steel parts*. Assignee: IQ Technologies, Inc. Appl. No. 09/551,082. Filed: 18.04.2000.
21. Lykov, A. V. (1967). *Teoriia teploprovodnosti*. Moscow: Vysshaia shkola, 600.
22. Kondratev, G. M. (1954). *Regulyarnyi Teplovoy Rezhim*. Moscow: Gostekhizdat, 364.
23. Kondratev, G. M. (1957). *Teplovye Izmereniya*. Moscow: Mashgiz, 250.
24. Kadinova, A. S., Kheifets, G. N., Taits, N. IU. (1963). O kharaktere teploobmena pri struinom okhlazhdenii. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 6 (4), 46–50.
25. Xie, L., Funatani, K., Totten, G. (Eds.) (2004). *Handbook of Metallurgical Process Design*. CRC Press, 957. doi: <http://doi.org/10.1201/9780203970928>
26. Totten, G. E., Bates, C. E., Clinton, N. A. (1993). *Handbook of quenchants and quenching technology*. ASM international, 513.
27. Kobasko, N., Guseynov, Sh., Rimshans, J. (2019). *Core Hardness and Microstructure Prediction in Any Steel Part*. Lambert Academic Publishing, 104.
28. Aronov, M. A., Kobasko, N. I., Powell, J. A., Totten, G. E. (2010). *Intensive Quenching of Steel Parts. ASM Handbook. Vol. 4A. Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, 198–212.
29. Eshar, W. et. al. (1987). Technology of cooling at heat treating of materials. *Chernyye metally*, 6-7, 3–12.
30. Buikis, A. (2020). *Multidimensional Mathematical Models for Intensive Steel Quenching*. Lambert Academic Publishing, 136.
31. Petrash, L. V. (1959). *Zakalochnye Sredy*. Moscow-Leningrad: Mashgiz, 112.
32. Kobasko, N. (2018). New approach in modifying quenching processes based on possibility of controlling steel's surface temperature by insulating layer. *EUREKA: Physics and Engineering*, 6, 54–62. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00788>
33. Bobinska, T., Buike, M., Buikis, A. (2010). Hyperbolic heat equation as mathematical model of steel quenching of L- shape samples. *Proc. of the 5th IASME/WSEAS Int. Conf. on Continuum Mechanics, Fluids, Heat*. Cambridge: WSEAS Press, 21–26.
34. Mayinger, F. (1992). Thermo- and Fluidynamic Principles of Heat Transfer During Cooling. *Theory and Technology of Quenching*, 41–72. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-662-01596-4_3
35. Liscic, B. (2016). Measurement and Recording of Quenching Intensity in Workshop Conditions Based on Temperature Gradients. *Materials Performance and Characterization*, 5 (1), MPC20160007. doi: <http://doi.org/10.1520/mpc20160007>
36. Felde, I. (2015). Liquid Quenchant Database – Determination of Heat Transfer Coefficient during Quenching. *IDE 2015*. Bremen, 265–274.
37. Narazaki, M., Osawa, K., Shirayoshi, A., Fuchizawa, S. (1999). Influence of validity of heat transfer coefficients on simulation of quenching process of steel. *Proceedings of the 19th ASM Heat Treating Society Conference. ASM International*. Materials Park, 600–607.