

УДК 621.785.363:669.14

Корягин Ю.Д., Куликов А.А., Мирзаев Д.А.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТВЕРДОСТЬ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Описаны режимы термической обработки для снижения твердости отливок, полученных методом литья по газифицируемым моделям. Подобраны температурно-временные параметры отжига. Представлены результаты испытания экономичных режимов отжига для получения заданных свойств отливок.

**Ключевые слова:** литьё, отжиг, нормализация, отпуск, твердость, ударная вязкость.

The paper describes regimes of heat treatment to reduce the hardness of consumable pattern steel castings, selected time-temperature parameters of annealing and results of testing the economical annealing regimes producing required properties of castings.

**Key words:** casting, annealing, normalizing, tempering, hardness, impact toughness.

### Введение

Отливки деталей часто подвергаются термической обработке с целью понизить твердость перед последующей механической обработкой или обеспечить определенный уровень прочности или ударной вязкости, если эта обработка является окончательной. Во всех случаях технологи стремятся выбрать из множества возможных режимов наиболее экономичный, с позиции затрат печного времени или производительности участка. Обширные исследования в этом направлении опубликованы в статьях [1–4].

В данной статье также представлены результаты работы по выбору экономичного режима термообработки, обеспечивающего минимальную твердость образцов стали 35Л, полученных литьем по газифицируемым моделям.

### 1. Материал и методика исследования

В качестве материала были использованы отливки из стали 35Л, изготовленные в цехе ЗАО «Технология-М». Здесь расплавленная сталь заливается в металлические формы, заполненные вспененным полистиролом  $[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$  и, передавая ему тепловую энергию, вызывает превращение полимера в газовую фазу с общей формулой  $C_nH_{2n+2}$ , где  $n=1, 2, 3$  и т.д. Следует отметить, что под влиянием газа проявляется некоторое науглероживание стали, особенно заметное у поверхности отливки. При нарезании плоских образцов для исследований размерами  $10 \times 15 \times 10$  мм одна из граней (широкая) образца расположена близко к поверхности реза; именно на ней твердость оказывалась заметно выше, чем на противоположной стороне, и это различие устойчиво сохранялось после почти всех обработок.

Твердость НВ измеряли с помощью прибора Бригелля при нагрузке 3000 кгс на противоположных сторонах пластинок. Химический состав был определен методом спектрального анализа трех отливок, у которых изучен состав приповерхностных зон: 0,41–0,45%С; 0,84–0,61%Si; 0,72%Mn; 0,19–0,21%Cr и 0,09%Ni. Однако, если судить по твердости в центре отливок, среднее по объему содержание углерода составляет 0,33–0,37%. Структуру литых образцов (рис. 1) можно охарактеризовать в одном случае как ферритно-перлитную (рис. 1, а), а во втором (рис. 1, б) как структуру игольчатого феррита [4] (или бейнита), возникающую в условиях непрерывного охлаждения по сдви-

говому, но диффузионному механизму.

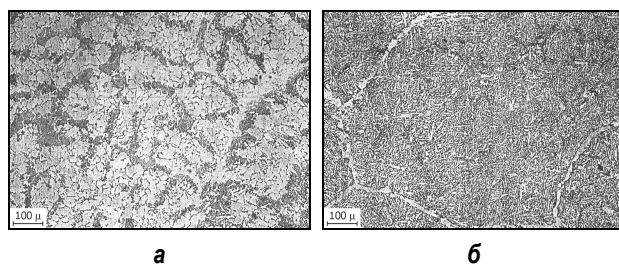


Рис. 1. Структура литой стали

Эта структура характеризуется более высокой прочностью и твердостью, чем ферритно-перлитная. Исследование структур было проведено с помощью оптического микроскопа Neophot-2. Измерения критических точек сталей осуществлялось по кривым нагрева и охлаждения (рис. 2), записанным на дилатометре Netzsch DIL 402С.

Ряд опытных режимов термической обработки отливок, направленных на снижение твердости, был реализован в электрической печи ПКЛ-1,2-12, снабженной задатчиком и регулятором дискретных температур. Точность регулирования была не менее  $\pm 0,5$  К. Скорость охлаждения образцов в выключенной печи составляет 420 К/ч, что приблизительно соответствует охлаждению промышленной партии отливок на воздухе (нормализации).

### 2. Результаты исследования и их обсуждение

#### 2.1. Дилатометрия

Были записаны дилатограммы трех образцов, вырезанных из отливки, представленной для исследования. На рис. 2 показана типичная дилатограмма. При нагревании образцов со скоростью 10 К/ч начало образования аустенита наблюдалось при 755, 756 и 760°C, что на 35–40°C выше, чем для углеродистой стали. Образование аустенита заканчивалось при температурах 808, 822 и 829°C. Дальнейший нагрев до 900°C проводился уже в аустенитном состоянии. Затем следовало охлаждение со скоростью 10 К/ч, которое сначала также проходило в аустенитном состоянии (см. рис. 2), но затем наблюдалось превращение аустенита, на дилатограмме отмеченное переходом от ниспадающей линии к восходящей.

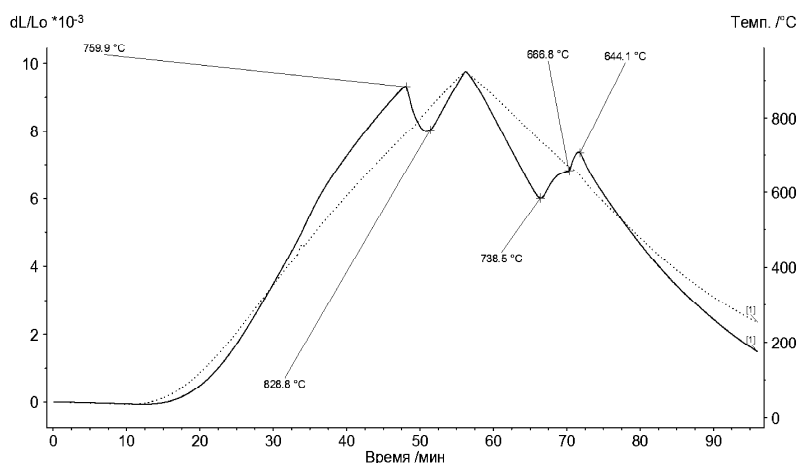


Рис. 2. Типичная дилатограмма нагрева и охлаждения образца стали 35Л

Соответствующая температура изгиба (минимума) есть точка начала выделения феррита. Она равна для трех образцов 740, 748 и 738°C. Однако, как известно [4], распад аустенита проходит в две стадии по шкале температуры. Действительно, восходящая линия состоит из двух участков, разделенных перегибом. На первом участке происходит образование феррита, причем нераспавшийся аустенит обогащается углеродом. Второй участок рассматриваемой восходящей линии отражает образование перлита, причем как первая, так и вторая реакция распада сопровождаются увеличением объема образца. Температуры начала образования перлита у трех исследованных образцов несколько различаются и составляют 675, 682 и 667°C. Температура конца образования перлита есть та наивысшая точка, за которой кривая начинает резко опускаться вниз; она равна 655, 671 и 644°C. Таким образом, образование перлита в наших образцах происходит в температурном интервале 675–655, 682–671 и 667–664°C. Напомним, что для углеродистой стали выделение перлита начинается при температуре 723°C. В исследуемой стали температура образования перлита смещена вниз на 42–56°C под влиянием примесей, снижающих точку  $A_1$ .

Важный результат проведенного исследования заключается в том, что можно повысить температуру изотермического отжига с 690–700 до 715–730°C, что и было использовано далее.

## 2.2. Отжиг без фазовой перекристаллизации

Как известно [1], некоторое снижение прочностных свойств дает отжиг перлитной структуры ниже  $A_{c1}$ . Для изучения возможности такой термообработки были проведены следующие эксперименты:

а) Образец № 3 был помещен в печь с температурой 700°C и выдержан 11 ч с перерывами на охлаждение и измерения твердости. В результате такого отжига твердость понизилась со 192/201 до 170/172 НВ (в форме дробы указаны значения твердости с двух сторон пластины). Здесь же было проверено влияние предварительного низкотемпературного отжига при 350°C, 4 ч, на твердость отливок. По мнению авторов [1, 2], такой отжиг приводит к выделению водорода, а потому понижает твердость. В наших экспериментах влияние

такого отжига не проявилось.

б) Режим ступенчатого отжига: 740°C, 2 ч + 700°C, 5 ч с перерывами на измерения был изучен на образце № 4. В итоге твердость понизилась со 196/204 до 179/163 НВ, но на одной стороне она все же сохранила повышенное значение.

в) Термоциклический отжиг 750°C, 0,5 ч + 670°C, 0,5 ч + 750°C, 0,5 ч дал слабое снижение твердости от 194/182 до 187/170 НВ.

г) Изотермический отжиг при повышенной до 715°C температуре был изучен на трех образцах, отличающихся друг от друга уровнем исходной твердости, причем с противоположных сторон одного образца значения твердости также различались. Об-

разцы были помещены в печь, нагретую до 715°C, и выдержаны сначала 2,5 ч, затем после охлаждения в печи и измерения твердости еще 2 ч и, наконец, 3,5 ч при третьей посадке. Характер изменения твердости при выдержках показан на рис. 3.

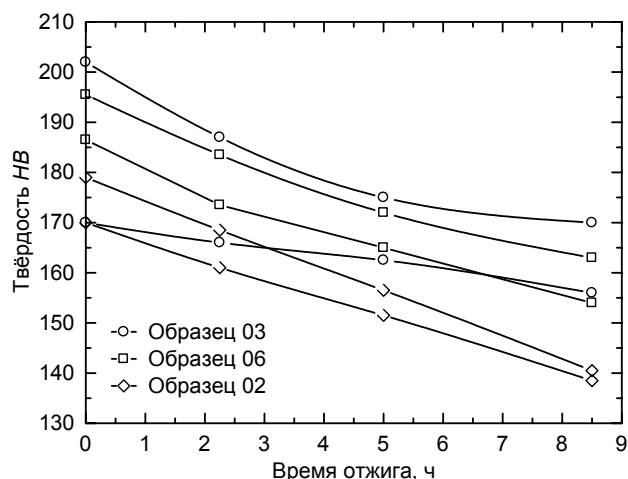


Рис. 3. Зависимость твёрдости образцов литой стали 35Л с различной исходной твёрдостью от длительности отжига при 715°C

После отжига 8,5 ч твердость понизилась с 210 до 170 НВ, а в случае низкой исходной твердости 170 НВ она уменьшилась до 140 НВ. Это означает, что самый экономичный способ понизить твердость отливок заключается в отжиге при 715–730°C. Такой эксперимент был проведен в цехе (отжиг при 735°C) и дал очень хороший результат: для реальной садки литья твердость снизилась до 131–156 НВ. Однако вид микроструктуры с крупным зерном (см. рис. 1) вызвал некоторые сомнения в том, что ударная вязкость окажется достаточной для потребителя, хотя она обычно не входит в число сдаточных параметров. Так как ее величина возрастает при уменьшении твердости, то есть основания считать, что примененный отжиг не должен вызвать значительного снижения ударной вязкости. Учитывая вышесказанное, нами был изучен вариант термообработки, включающий фазовую перекристаллизацию.

### 2.3. Отжиг с фазовой перекристаллизацией

Многие авторы [1–3] рекомендуют нормализацию в качестве основного способа снижения твердости отливок. Однако эффект нормализации несомненно зависит от массы садки через скорость охлаждения. В наших экспериментах температура аустенитизации была принята равной 900°C. Так как охлаждение образцов в выключенной печи в интервале температур от 800 до 600°C проходит со средней скоростью 7 К/мин, примерно такой же, как у промышленной садки литых деталей, перенесенных из печи на спокойный воздух, то имитация нормализации достигалась простым отключением электронагрева печи. Для изучения влияния нормализации, а затем отжига и более сложных обработок на твердость были проведены новые опыты.

1. Воздействие однократной нормализации (900°C, 30 мин + охлаждение) оказалось неудовлетворительным. Твердость понизилась с 215/207 до 192/177 НВ. Повторный эксперимент на новом образце дал сходный результат. Твердость уменьшилась с 232/225 в исходном состоянии до 197/181 НВ после нормализации.

2. Двукратная нормализация также не дала положительного результата. Исходная твердость 190/219 немного снизилась до 179/215 НВ после первой нормализации, а вторая нормализация также не привела к изменению твердости (187/201 НВ).

3. Вариант полного отжига при 900°C был смоделирован ступенчатым охлаждением через 10°C с выдержкой на каждой ступени 10 мин. Ниже 600°C охлаждение проводили с печью. Средняя скорость охлаждения оказалась равной 100 К/ч. Здесь достигнут один из наилучших результатов. Твердость отливок снизилась от 207/235 до 165/174 НВ. Положительная роль замедленного охлаждения проявилась здесь отчетливо. Но поскольку распад переохлажденного аустенита по первой ступени имеет два температурных интервала, соединенных между собой, причем в первом из них происходит выделение феррита, а во втором – образование перлита, то возникает вопрос: как повлияет на конечную твердость замедление или ускорение превращения в каждом из интервалов?

4. Были проведены эксперименты, в одном из которых образец, аустенитизированный при 900°C в течение 20 мин, был относительно быстро охлажден в печи от 900 до 700°C за 22 мин, а затем проводилось его замедленное ступенчатое охлаждение с шагом 10°C и выдержкой 12 мин при каждой температуре в интервале перлитного распада. Ниже 600°C охлаждение проходило при выключенной печи. Второй образец, наоборот, медленно, с шагом 10°C и выдержками 17 мин, был охлажден в интервале 800–700°C, где проходит выделение феррита, а ниже 700°C его охлаждение проводили в печи. Оказалось, что у образца после первой обработки твердость снизилась с 202/217 до 166/176, а во втором случае – с 196/204 до 179/183 НВ. Отсюда следует вывод, что для достижения низкой твердости охлаждение должно быть замедленным в интервале формирования перлита.

Для двух образцов, один из которых был нормализован и имел твердость 197/181, а второй был подвергнут полному отжигу на твердость 165/174 НВ, был проведен дополнительный отжиг (отпуск) в течении

3 ч при 720°C. После этого твердость образцов, по существу, сравнялась, достигнув значения НВ163/170. Видимо, структура тонкопластинчатого перлита, полученная при нормализации, в ходе отжига разрушается быстрее, чем грубопластинчатый перлит исходного отжига. Поэтому отпуску нормализованных образцов было уделено значительное внимание.

5. Три образца были помещены в печь с температурой 900°C и выдержаны 1 ч, затем охлаждены в печи до комнатной температуры, вновь нагреты до 720°C и выдержаны последовательно 3 и 7 ч. Графики зависимости твердости от длительности отжига показаны на рис. 4.

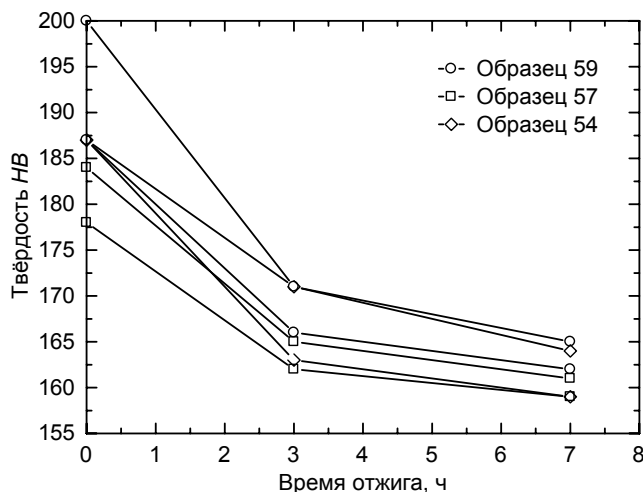


Рис. 4. Зависимость твердости образцов литой и нормализованной стали 35Л от длительности отжига при 720°C

Использованные образцы имели разную исходную твердость и между собой, и с двух сторон широкого основания каждого образца. Но уже после 3 ч выдержки твердость оказывается меньше 170, а после 7 ч отжига опускается ниже 165 НВ. По-видимому, нормализация от 900°C и 5–7-часовой отжиг при 720–730°C является наиболее экономичным режимом снижения твердости литых деталей в тех случаях, когда заказчик выдвигает требования структурной перекристаллизации для повышения ударной вязкости стали. Заметим, что охлаждение от 900°C не обязательно доводить до комнатной температуры; можно охладить садку до 630–600°C, когда превращение аустенита завершается, и сразу же нагреть до 720–730°C под отжиг.

Возможность использования изотермического отжига от температур выше  $A_{c3}$  рассмотрена во второй статье тех же авторов.

### 2.4. Закалка и отпуск

Закалка с отпуском редко используется в литейных цехах для снижения твердости отливок из-за опасений получить закалочные трещины в переходах у отливок сложной формы. Однако изучить влияние этого вида термообработки на твердость и ударную вязкость отливок представлялось важным. В опытах этого раздела были использованы образцы стали 35Л из треновидных проб, отлитых в обычные песчано-глинистые формы.

Сталь содержала 0,38%С; 0,34%Si; 0,47%Mn; 0,3%Cr; 0,3%Ni; 0,3%Cu и по 0,040–0,045%S и P. После кристаллизации и охлаждения из проб вытачивали цилиндрические заготовки и квадратные бруски для последующего изготовления разрывных и ударных образцов. Термическая обработка, различные режимы которой приведены в таблице, включала следующие операции:

а) нормализация (Н.): нагрев до 880°C и выдержка 2 ч вместе с промышленной партией изделий. Охлаждение проводилось на воздухе, но скорость охлаждения была в 2,5 раза меньше, чем указанная в предыдущих разделах, поэтому твердость после нормализации оказалась ниже;

б) закалка (З.) от 870°C с выдержкой 1,2 ч и охлаждением образцов в воде с температурой 50°C;

в) отпуск (О.) в течение 2 ч проводился при 215 (низкий), 475 (средний) и 640°C (высокий); охлаждение образцов осуществлялось на воздухе.

Результаты исследования, представленные в таблице, интересны в нескольких отношениях. Во-первых, видно, что высокий отпуск при 700°C литой структуры действительно увеличивает ударную вязкость. Во-вторых, после закалки и относительно высокого отпуска (640°C) ударная вязкость повышается до 45 Дж/см<sup>2</sup>, а если предварительно сделать одноили двухкратную нормализацию, то до 94 Дж/см<sup>2</sup>; твердость при этом снижается до 158–166 НВ. Отметим, что температуру высокого отпуска можно поднять до 715–730°C, что позволит дополнительно уменьшить твердость. И, наконец, при варьировании температуры отпуска от 215 до 640°C и выше можно обеспечить изменение прочности, твердости и ударной вязкости в широких пределах так, чтобы удовлетворить требования потребителя.

**Механические свойства образцов 35Л, подвергнутых термообработке по различным режимам**

| № п/п | Режим термической обработки    | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_{в}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | КСУ, Дж/см <sup>2</sup> | НВ  |
|-------|--------------------------------|----------------------|--------------------|--------------|------------|-------------------------|-----|
| 1     | Исходное литое состояние       |                      |                    |              |            | 6,5                     | 270 |
| 2     | Исх. + О. 700°C, 5 ч           | 295                  | 600                | 11           | 15         | 22                      | 169 |
| 3     | Исх. + Н.                      | 325                  | 635                | 20,5         | 23,6       | 31                      | 172 |
| 4     | Исх. + Н. + Н.                 | 340                  | 615                | 21,2         | 22         | 37                      | 170 |
| 5     | Исх. + З. + О. 215°C           | –                    | 1590               | –            | –          | 13                      | 460 |
| 6     | Исх. + З. + О. 475°C           | 690                  | 800                | 9            | 13         | 19                      | 255 |
| 7     | Исх. + З. + О. 640°C           | 405                  | 620                | 16           | 64         | 45                      | 158 |
| 8     | Исх. + Н. + З. + О. 215°C      | –                    | 1350               | –            | –          | 20                      | 390 |
| 9     | Исх. + Н. + З. + О. 475°C      | 720                  | 830                | 12           | 24         | 31                      | 250 |
| 10    | Исх. + Н. + З. + О. 640°C      | 300                  | 550                | 19           | 27         | 80                      | 162 |
| 11    | Исх. + Н. + Н. + З. + О. 215°C | –                    | 1270               | –            | 6          | 34                      | 265 |
| 12    | Исх. + Н. + Н. + З. + О. 640°C | 310                  | 525                | 24           | 29         | 94                      | 166 |

**Общие выводы**

1. Критические точки литых сталей типа 35Л могут быть значительно смещены относительно аналогичных точек углеродистых сталей под влиянием примесей (Si, Mn, Cr, Ni) и химической неоднородно-

сти. В исследованных сталях температура начала образования аустенита  $A_{c1}$  смещена вверх на 35–40°C, тогда как температуры начала образования феррита  $A_{f3}$  и перлита  $A_{f1}$  смещены вниз соответственно на 48–51 и 40–55°C.

2. Среди изученных режимов отжига литой стали без фазовой перекристаллизации оптимальным по длительности и энергозатратам является изотермический отжиг при температурах 715–735°C, причем длительность отжига можно сократить с 8 до 5 ч и менее при повышении температуры до 735°C. Однако такой отжиг не изменяет размер аустенитного зерна, а потому не может значительно снизить порог хладноломкости в случае ответственных изделий.

3. В том случае, когда заказчик выдвигает требование структурной перекристаллизации для повышения ударной вязкости стали, оптимальным режимом термической обработки является нормализация от 900°C и 5–7-часовой отжиг при 715–730°C (под точкой  $A_{c1}$ , но ни в коем случае не переходя ее). Охлаждение от 900°C не обязательно доводить до комнатной температуры; можно, охладив садку до завершения распада переохлажденного аустенита (630–600°C), сразу же нагреть ее до 715–730°C под отжиг.

4. Режим полного отжига, разумеется, также применим, но для его проведения требуются существенно большие затраты «печного» времени. Сокращение длительности отжига возможно за счет ускоренного охлаждения отливок в температурной области от 900 до 730°C, после чего необходимо замедленное охлаждение со скоростью не выше 10 К/ч.

5. Довольно эффективным способом снижения твердости отливок и увеличения ударной вязкости является закалка с отпуском, причем температуру отпуска следует выбирать в зависимости от требуемого уровня механических свойств. Отпуск при 640°C и выше позволяет получить твердость ниже 160 НВ при уровне ударной вязкости выше 45 Дж/см<sup>2</sup>.

**Список литературы**

1. Иванюшкин, И.П. Термическая обработка литой углеродистой стали 25Л и 20Л / И.П.Иванюшкин, К.Н.Куликова // Труды всесоюзного совещания. М.: Mashgiz, 1955. С. 225–238.
2. Иванюшкин, И.П. Выбор оптимального режима термической обработки / И.П.Иванюшкин, К.Н.Куликова // Улучшение качества отливок: сб. науч. тр. М.: Mashgiz, 1958. С. 86–94.
3. Передовая технология термической обработки. М.: Свердловск: Mashgiz, 1961. С. 16–26.
4. Йех, Я. Термическая обработка стали / Я. Йех. М.: Металлургия, 1979. С. 92–95.

**Bibliography**

1. Ivanyushkin, I.P. Heat treatment of cast carbon steels 25L and 20L / I.P. Ivanyushkin, K.N.Kulikova // Proceedings of the All-Union Conference. M.: Mashgiz, 1955. Pp. 225–238.
2. Ivanyushkin, I.P. Selection of an optimal heat treatment regime / I.P.Ivanyushkin, K.N.Kulikova // Improvement the quality of castings. M.: Mashgiz, 1958. Pp. 86–94.
3. Advanced heat treatment technology. M.: Sverdlovsk: Mashgiz, 1961. Pp. 16–26.
4. Jech, J. Tepelné zpracování oceli / J.Jech. Praha: SNTL, 1977.