

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГО ИНДУКЦИОННОГО ОТЖИГА ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 15Х

Т.В. СОКОЛОВА*, канд. техн. наук, доцент,

А.М. СОКОЛОВ**, канд. техн. наук, член-корр. АПК РФ

* Российский университет дружбы народов,

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6 sokolova.rudn@gmail.com

**ОАО «НИИТавтопром» asokolov88@gmail.com

Статья посвящена разработке технологии разупрочняющего индукционного отжига стали 15Х, необходимого для последующей операции холодной объемной штамповки. Разработаны режимы разупрочняющего индукционного отжига. Проанализированы механические свойства и характеристики микроструктуры. Показано, что форма цементита не играет роли в процессе холодного деформирования низкоуглеродистых малолегированных сталей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкционная (строительная) холоднодеформируемая низкоуглеродистая малолегированная сталь, холодная объемная штамповка (ХОШ), отжиг, индукционный нагрев, разупрочняющая термическая обработка (РТО), разупрочняющий индукционный отжиг, микроструктура стали, твердость, микротвердость, предел текучести.

В настоящее время одним из наиболее прогрессивных методов изготовления деталей (в том числе крепежных, широко используемых в строительстве) является холодная объемная штамповка (ХОШ). Применение низколегированных сталей 15Х, 15ХР, 12ХН взамен углеродистых с аналогичным содержанием углерода позволяет повысить прочность штампованных изделий, а проведение предварительной разупрочняющей термической обработки заготовок (РТО) повышает стойкость и ресурс службы инструмента (пуансон, матрица) в несколько раз.

Операции предварительной термической обработки заготовок, осуществляемые в шахтных, камерных или проходных электропечах, отличаются большой длительностью и трудоемкостью, а также требуют принятия дополнительных мер по защите заготовок от окалинообразования. Интенсификацию операций предварительной термообработки, а, следовательно, и процессов ХОШ в целом можно осуществить за счет применения сквозного индукционного нагрева взамен печного. Это позволит повысить производительность труда, автоматизировать процесс (осуществить термообработку в поточных линиях) и получить заготовки без окалина. Однако до сих пор принято считать, что применение индукционного нагрева для отжига (в обычном понимании роли этого процесса) невозможно, так как малая длительность нагрева не обеспечит полной гомогенизации аустенита, а отсутствие выдержки по окончании нагрева не позволит получить полностью равновесной и однородной структуры стали и, в итоге, снизить ее твердость и сопротивление деформации до требуемого уровня [1, 2]. Такое заключение, на наш взгляд, справедливо для случая сравнительно быстрого охлаждения заготовок на воздухе. Проведение же замедленного регламентированного охлаждения с учетом особенностей кинетики распада образовавшегося при индукционном нагреве аустенита может обеспечить оптимальную структуру и свойства заготовок перед холодной деформацией.

Целью настоящего исследования являлась разработка ускоренного способа разупрочняющей термической обработки с применением индукционного нагрева заготовок из низкоуглеродистых сталей ферритно-перлитного класса,

обеспечивающего получение необходимого комплекса свойств для последующего проведения операций ХОШ.

Для исследования выбрали некалиброванную сталь 15Х промышленной выплавки, химический состав которой соответствовал ГОСТ 4543-71. Термическую обработку заготовок проводили в промышленной камерной электропечи СНВ 6.12.4/ЮМ. Для защиты поверхности стали от окисления и окалинообразования использовали чугунную стружку. Сквозной индукционный нагрев стали проводили на тиристорной установке ИК I-250/2,4 мощностью 250 кВт и частотой тока 2400 Гц. Кинетику нагрева и охлаждения изучали с помощью гибких хромель-алюмелевых термопар, зачеканенных в заготовки. В качестве регулирующих и контрольно-измерительных приборов использовали потенциометры КСП-4. Точность регулирования температуры $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Механические свойства исследованных сталей ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$, δ , ψ) определяли в испытаниях на растяжение стандартных цилиндрических образцов диаметром рабочей части 6 мм (ГОСТ 1497-73, тип III) на испытательной машине ИМ-4Р с записью диаграммы нагружения. Приведенные в работе значения механических свойств стали являются средними величинами по результатам испытания 3-5 образцов. Твердость по Бринеллю (НВ) измеряли на приборе ТШ-2М под нагрузкой 7,5 кН диаметром индентора (шарика) 5 мм. Для построения кривых упрочнения использовали один из наиболее точных методов исследования упрочнения – метод экстраполяции Лоде [3, 4]. Микротвердость структурных составляющих стали определяли на приборе ПМТ-3 под нагрузкой 0,5 Н. Микроструктуру стали изучали с помощью оптических микроскопов Epitip и Neophot при увеличениях $\times 100 \div 1000$ на шлифах, протравленных в 4%-ом растворе азотной кислоты в спирте.

Оптимальный режим нагрева должен обеспечить выполнение следующих требований: во-первых, полное завершение аустенитизации в объеме заготовки [5,6]; во-вторых, однородность структуры по сечению заготовки, что возможно при минимальном перепаде температур (ΔT_{min}) между поверхностью и центром; в-третьих, отсутствие окалины на поверхности заготовок. В ходе экспериментов было установлено, что необходимые требования можно реализовать при нагреве заготовок до $960 - 1000^{\circ}\text{C}$ со скоростью $20-25^{\circ}\text{C}/\text{с}$. При этом ΔT_{min} не превышает $40-50^{\circ}\text{C}$, обеспечивается полное завершение $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, отсутствие окалины на поверхности заготовок. Твердость стали после охлаждения на воздухе не превышает НВ 146, а структура представляет ферритно-перлитную смесь с размером ферритного зерна не более № 7-8 по шкале I (ГОСТ 5639-82). Структурная неоднородность по сечению и полосчатость не наблюдаются.

Таблица 1

Режимы РТО стали 15Х

№ режима	Способ нагрева	Температура нагрева $t, ^{\circ}\text{C}$	Время нагрева, с	Время выдержки, ч	Скорость охлаждения, $^{\circ}/\text{мин}$			Температура изменения скорости охлаждения, $^{\circ}\text{C}$		
					I этап	II этап	III этап	I этап	II этап	III этап
1	ТВЧ	960	45	-	200	4-6	25-30	900	720	500
2	ТВЧ	960	45	-	200	4-6		900	500	
3	печной	840	-	4	Охл с печью					
4	печной	750	-	3	Охл с печью					

Примечание: охлаждение заготовок по завершении регламентированных этапов: режим 1, этап III; режим 2, этап II производят на воздухе.

Характеристики свойств и структуры стали 15X после РТО

Состояние	НВ	ρ , МПа	Соотношение структурных составляющих, %	H^{Φ}_{50}	Номер зерна феррита	Балл ферритной полосчатости
Поставка	178-196	-	75%Ф + 25% П _П	175-201	6-7	2
РТО, режим 1	128-134	-	80%Ф + 20% П _з	133-152	7-8	0
РТО, режим 2	124-130	1900	80%Ф + 20% П _П	128-146	6-7	0
РТО, режим 3	120-128	1900	80%Ф + 20% П _П	124-140	5-6	2
РТО, режим 4	138-146	-	75%Ф + 15% П _з + 10%П _П	146-168	6-7	2

Примечание: П_П – перлит пластинчатый; П_з – перлит зернистый; номер зерна по шкале 1 (ГОСТ 5639-82); H^{Φ}_{50} – микротвердость феррита.

На рис.1 представлены микроструктура стали 15X после разупрочняющей термообработки с индукционным нагревом (рис.1, а и б) и в результате традиционного печного нагрева (рис.1, в). Таким образом, разработанный режим нагрева обеспечивает необходимые условия для формирования требуемых структуры и свойств при последующем охлаждении.

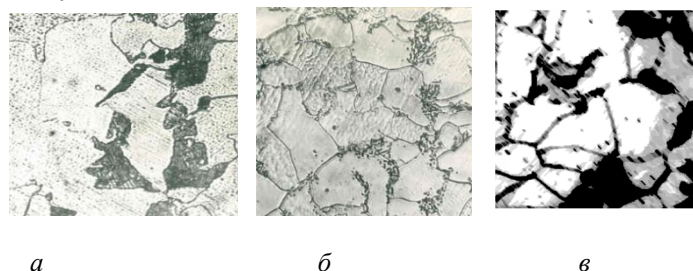


Рис. 1. Микроструктура стали 15X после различных режимов разупрочняющей термообработки, х 1000: а – режим 1, индукционный нагрев (зернистый перлит); б – режим 2, индукционный нагрев (пластинчатый перлит); в – печной отжиг

Исследование кинетики распада аустенита стали 15X, образовавшегося при индукционном нагреве, показало, что его устойчивость значительно ниже по сравнению с печным нагревом до тех же температур. Начало выделения свободного феррита при охлаждении наблюдается уже при 840°C , тогда как после печного нагрева эта температура составляет 790°C . Это является следствием мелкодисперсности и химической неоднородности аустенита после индукционного нагрева. Как известно, в сталях исследуемого класса основной структурной составляющей которых является феррит, максимальное разупрочнение в результате термической обработки достигается за счет формирования однородной по химическому составу минимально легированной ферритной матрицы, обладающей низкой твердостью. Для формирования такой микроструктуры, а, следовательно, получения низкого сопротивления деформации и высокой пластичности заготовок скорость их охлаждения в аустенитной области и в области выделения свободного феррита (второй этап охлаждения, см. табл.1) должна быть минимальной. Охлаждение заготовок со скоростью $4-6^{\circ}\text{C}/\text{с}$ в температурной области $900 - 700^{\circ}\text{C}$ обеспечивает получение максимально разупрочненной матрицы ($H^{\Phi}_{50} = 128-146$). В зависимости от скорости последующего охлаждения до 500°C (третий этап охлаждения) в заготовках формируется микроструктура с пластинчатым или зернистым перлитом. Пластинча-

тый перлит (рис. 1, б) выпадает при охлаждении со скоростью, меньшей 10 °/мин. Увеличение скорости охлаждения до 25-30 °/мин приводит к формированию структуры с зернистым перлитом (рис.1, а).

Основываясь на полученных результатах, был изготовлен опытный образец камеры замедленного охлаждения, конструкционные особенности которой позволили проводить охлаждение с разными скоростями в диапазоне 5 – 50 °/мин на партиях заготовок в количестве до 300 штук. Результаты обработки опытных партий заготовок с охлаждением в камере по различным режимам приведены в таблицах 1 и 2 (режимы 1 и 2).

Для сравнения полученных результатов и оценки уровня достигнутого разупрочнения был проведен печной отжиг партии заготовок на различную твердость по известным производственным режимам (режимы 3 и 4). Деформируемость оценивали по кривым упрочнения, построенным по результатам испытаний образцов на одноосное сжатие (рис. 2).

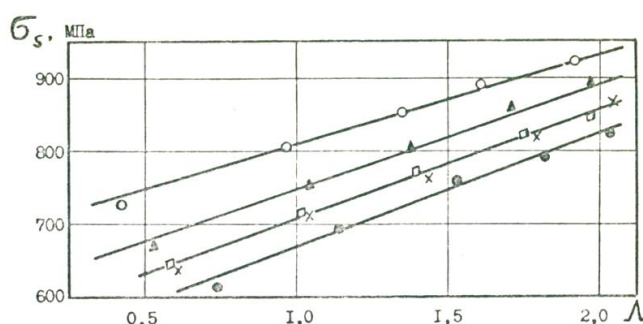


Рис. 2. Кривые деформационного упрочнения стали 15Х:

О – исходное состояние - РТО, режим 1;
х – РТО, режим 2; • - РТО, режим 3; ▲ - РТО, режим 4.

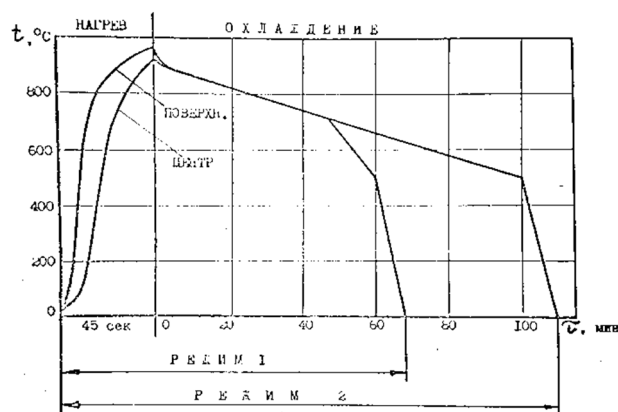


Рис. 3. Схема процесса разупрочняющей термической обработки с индукционным нагревом по режиму 1 и 2 (см. табл.1)

Как видно из полученных данных, разупрочняющая термическая обработка с индукционным нагревом (режимы 1 и 2) обеспечивает значительное снижение твердости и напряжения текучести σ_s , формирует благоприятную структуру стали. Следует отметить, что деформируемость стали 15Х с различной формой цементита, образовавшегося при обработке с нагревом ТВЧ практически одинакова (кривые 2 и 3); разница абсолютных значений напряжения текучести на этих кривых во всем исследованном диапазоне исследованных степеней деформации не превышает погрешности эксперимента (менее 3%). Таким образом, при разработке промышленной технологии РТО с индукционным

нагревом можно отказаться от регламентированного охлаждения в температурной области перлитного превращения, что позволит значительно упростить режим и конструкцию камеры замедленного охлаждения.

На основании полученных результатов исследования процессов сквозного индукционного нагрева и регламентированного охлаждения оптимальным режимом следует признать индукционный нагрев до 950 – 970 °С в течение 45 – 50 с, охлаждение до 900 °С на воздухе, далее - до 550 °С в установке замедленного охлаждения со скоростью 2 – 8 °/мин и дальнейшее охлаждение на воздухе. Такая обработка обеспечивает снижение твердости заготовок перед холодным выдавливанием до НВ124-134, тогда как технологическим процессом, действующим на заводах и предусматривающим печной нагрев, допускается твердость до НВ143. Проведенный анализ и результаты штамповки опытно-промышленных партий показали, что параметры заготовок отвечают всем технологическим требованиям. Стойкость инструмента на лимитирующих позициях выдавливания находится на уровне, достигнутом при штамповке заготовок после печного отжига.

Л и т е р а т у р а

1. Гурченко П.С., Шипко А.А. История и направления развития индукционного нагрева ТВЧ на Минском автомобильном заводе // Литье и Металлургия. – 2013. – № 2 (70). – С. 91-105

2. Кидин И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 316 с.

3. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения. – В кн.: Разрушение. Т. 2/ под ред. Г. Либовица: пер. с англ. М.: Мир, 1975. – С. 339-520.

4. Ломов С.Б., Соколова Т.В., Малькова М.Ю., Балакирев Э.В. Зависимость структуры стали 40X при холодной пластической деформации от исходной структуры и циклической термообработки // Металлургия машиностроения. – 2015, № 2. – С. 21-24.

5. Кидин И.Н., Штремель М.А. Процесс образования аустенита. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 44 с.

6. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 647 с.

References

1. Gurshenko, P.S., Shipko, A.A. (2013). Istoriya i napravleniya razvitiya indukcionnogo nagreva TVCh na Minskom avtomobilnom zavode, *Litiyo I Metallurgiya*, N2 (70), pp. 91-105.

2. Kidin, I.N. (1950). *Termicheskaya Obrabotka Stali pri Indukcionnom Nagreve*, Moscow: Metallurgizdat, 316 p.

3. Pol, B. (1975). Mikroskopicheskie kriterii plasticheskogo tesheniya i khrupkogo razrusheniya: V kn.: *Razrushenie*, Vol. 2, pod. red. G. Libovitca, Moscow: Mir, pp. 339-520.

4. Lomov, C.B., Sokolova, T.V., Malkova, M.U., Balakirev, A.V. (2015). Zavisimost struktury stali 40X pri holodnoy plasticheskoy deformatcii ot ishodnoy struktury i teiklicheskoj termoobrabotki, *Metallurgiya Machinostroeniya*, N 2, pp.21-24.

5. Kidin, I.N., Shtremel, M.A. (1961). *Protces Obrazovaniya Austenita*, Moscow: Metallurgizdat,

6. Guljaev A. P. *Mettallovedenie*. M.: Metallurgija, 1977, 647 S.

DEVELOPMENT of TECHNOLOGY SOFTENING INDUCTION ANNEALING OF WORKPIECES FROM STEEL X15

Sokolova T.V.*, Sokolov A. M.**

*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

**OAO "NIITAVTOPROM", Moscow

The article is devoted to the development of modes softening annealing treatment steel15X using high frequency induction heating with the purpose of conducting cold forging. Mechanical properties and microstructure characteristics were investigated. It was shown that the form of cementite does not play a role in the process of deformation of low-carbon low-alloy steel.

KEY WORDS: low carbon low alloy structural steel, cold forging, softening high frequency induction annealing, microstructure, hardness, microhardness, yield strength