



*Investigation of softening of strong-deformed high-carbon steel with different content of carbon at speed heating in low-temperature field is carried out.*

В. В. КРЫЛОВ-ОЛЕФИРЕНКО, В. М. АБАКУМОВ, А. Ю. СЕРЕГИН, ФТИ НАН Беларуси

УДК 621.785.797

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СКОРОСТНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Пластическую деформацию в промышленном производстве стремятся проводить на пределе возможностей обрабатываемых материалов. Разработанные для этого современные высокопроизводительные технологические процессы обработки давлением и оборудование для их осуществления в металлургическом производстве обеспечивают большую интенсивность и кратковременность воздействия на заготовки. Скорость движения полосы в многоклетевых станах горячей и холодной прокатки и проволоки в станах волочения достигает на выходе 30 м/с. Обычным значением суммарной степени обжатия является 70–98%, а за один проход – 20–40% при прокатке и 10–20% при волочении. Скорость деформации составляет величины порядка 300–400 с<sup>-1</sup> и более. Оценка времени пребывания в зоне деформации дает значения порядка тысячных и десятитысячных долей секунды.

Несмотря на достигаемые очень большие степени деформации, во многих случаях требуемое формоизменение при обработке давлением невозможно получить за одну операцию. Необходимым становится восстановление способности материала к дальнейшему формоизменению. Такое восстановление осуществляется при промежуточных операциях разупрочняющей термической обработки и связано с устранением образовавшихся при деформации дефектов кристаллического строения.

Существует несколько разновидностей термической обработки, используемой для восстановления способности металлов и сплавов к дальнейшей деформации. Они различаются по виду процессов, реализуемых при нагреве до заданных интервалов температур. В наиболее низкотемпературном интервале протекают дорекристаллизационные превращения, с повышением температуры

нагрева развивается рекристаллизация деформированной структуры с образованием равноосных зерен, при самых высоких температурах нагрева после дорекристаллизационных и рекристаллизационных превращений протекают фазовые превращения (прямые и обратные).

Наиболее простой и экономной является естественно термообработка в низкотемпературном, дорекристаллизационном, интервале температур при условии, что получаемые свойства удовлетворяют предъявляемым к изделию требованиям. В этом интервале температур протекает совокупность процессов, объединяемых под единым названием возврат – полигонизация. Считается, что в основе механизма всех этих процессов лежат диффузионное перераспределение, взаимодействие и аннигиляция точечных и линейных дефектов. Их активное развитие приводит к разупрочнению деформированных материалов в дорекристаллизационной области температур.

Сведений о результатах исследований возврата и полигонизации в деформированной и сильнодеформированной в перлитном состоянии высокоуглеродистой стали в литературе не найдено как для медленного, так и для скоростного видов нагрева. В то же время такие результаты имеют практическое значение и могут быть использованы при назначении режимов низкотемпературной разупрочняющей термообработки, обеспечивающей, в частности, сохранение высоких прочностных характеристик деформированного состояния при повышении пластических свойств до довольно высокого уровня. В данной работе было проведено исследование разупрочнения сильнодеформированной высокоуглеродистой стали различным содержанием углерода при скоростном нагреве в низкотемпературной области.

В качестве материала исследования использовали высокоуглеродистые стали 70 в виде проволоки диаметром 1 мм со степенью деформации 80%, сталь 80 в виде проволоки диаметром 1,33 мм, полученную волочением с использованием двух операций, и сталь 90 в виде проволоки диаметром 2,45 мм со степенью деформации 80%. Термообработку образцов проводили на установке электроконтактного нагрева. Использовали два режима нагрева: с постоянной скоростью нагрева до максимальной температуры без изотермической выдержки и с изотермической выдержкой и охлаждением в воде; со скоростью нагрева 400 °C/с до промежуточной температуры  $T_1$  со скоростью нагрева 60 °C/с в промежутке  $T_1 - T_{\max}$ , изотермической выдержкой 3 с при максимальной температуре и охлаждением в воде. Определяли механические свойства после различных режимов термообработки.

При нагреве стали 70 [1] по первому варианту со скоростью 400 °C/с (рис. 1) разупрочнение наблюдается уже при минимальной использованной температуре нагрева – 420 °C: предел прочности уменьшается относительно деформированного состояния на 230 МПа. При этом длительность нагрева составляет намного больше 1 с. Область температур 425–490 °C соответствует разупрочняющей части кривой зависимости предела прочности от температуры, а 520–550 °C – упрочняющей части. При нагреве до 460 °C  $\sigma_B$  становится равным 1840–1880 МПа, до 490 °C – 1560 МПа. С повышением температуры нагрева до 525 °C происходит повышение предела прочности до 1750 МПа, а затем снижение до 1630 МПа при 550 °C.

Результаты испытаний образцов после нагрева по второму режиму до температур 400 – 520 °C приведены на рис. 2 в зависимости от температуры замедления скорости нагрева, которая изменялась от 210 до 320 °C.

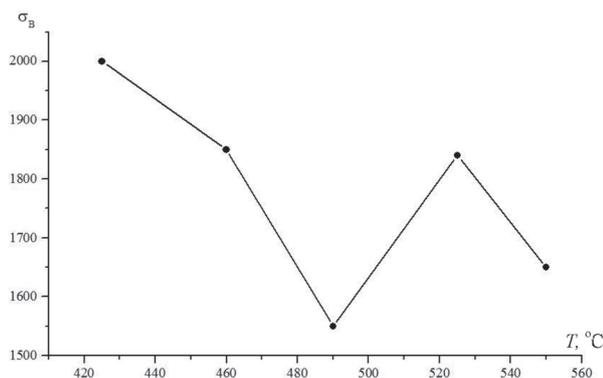


Рис. 1. Зависимость механических свойств от температуры нагрева. Скорость нагрева 400 °C/с без выдержки

Сравнение значений предела прочности при нагреве до одной и той же температуры по разным схемам показывает, что они больше при нагреве по второй схеме для всех температур, кроме 525 °C.

При температуре нагрева 400 °C (рис. 2, а) предел прочности сначала уменьшается до 2135 МПа при  $T_1 = 200$  °C и до 2120 МПа при  $T_1 = 220$  °C, а затем возрастает до 2185 МПа при температуре изменения скорости нагрева 240 °C. При дальнейшем повышении  $T_1$  происходит его уменьшение до 2090 МПа для  $T_1 = 300$  °C, максимального значения для данной температуры нагрева. Относительное удлинение для 200 °C остается близким к значению для деформированного состояния, однако для 220 °C получено хрупкое разрушение образца с нулевой пластичностью несмотря на то что предел прочности был почти самым низким для установленной температуры нагрева. При дальнейшем повышении  $T_1$  значение  $\delta$  увеличивается до максимального при 260 °C и снова уменьшается до 1% при 300 °C. Следует отметить также, что максимальное значение пластичности получено почти для самого высокого значения прочности, а минимальное (вплоть до полного охрупчивания) для самого низкого.

При температуре нагрева 425 °C (рис. 2, б) характер зависимостей  $\sigma_B(T_1)$  и  $\delta(T_1)$  сохраняется. Имеет место первоначальное снижение предела прочности до 2050 МПа для 220 °C и 1980 МПа для 240 °C. Затем он повышается до 2140 МПа для 280 °C и снова снижается до 2035 МПа для 310 °C.

Вид зависимостей изменяется в области температур нагрева 440–460 °C. Максимальное значение предела прочности для  $T = 440$  °C (рис. 2, в) соответствует  $T_1 = 220$  °C ( $\sigma_B = 2100$  МПа) и  $T_1 = 340$  °C ( $\sigma_B = 2120$  МПа). При промежуточных температурах замедления скорости нагрева предел прочности уменьшается до 1990–2010 МПа. Отмечается некоторое его возрастание при  $T_1 = 300$  °C до 2050 МПа. Промежуточному максимуму предела прочности соответствует падение относительного удлинения до 3%. Температура нагрева 460 °C (рис. 2, г) обеспечивает практически постоянные значения предела прочности (1900–1950 МПа) и относительного удлинения в интервале  $T_1 = 240 - 280$  °C с возрастанием  $\sigma_B$  до 1980 МПа и уменьшением  $\delta$  при 300 °C. Характерным является отсутствие в этой области температур нагрева хрупкого разрушения образцов при механических испытаниях.

Повышение температуры нагрева до 490 °C (рис. 2, д) обуславливает общее снижение прочности стали. При этом  $T_1 = 240$  °C соответствует значению 1805 МПа, 260 °C – 1865 МПа, 280 °C –

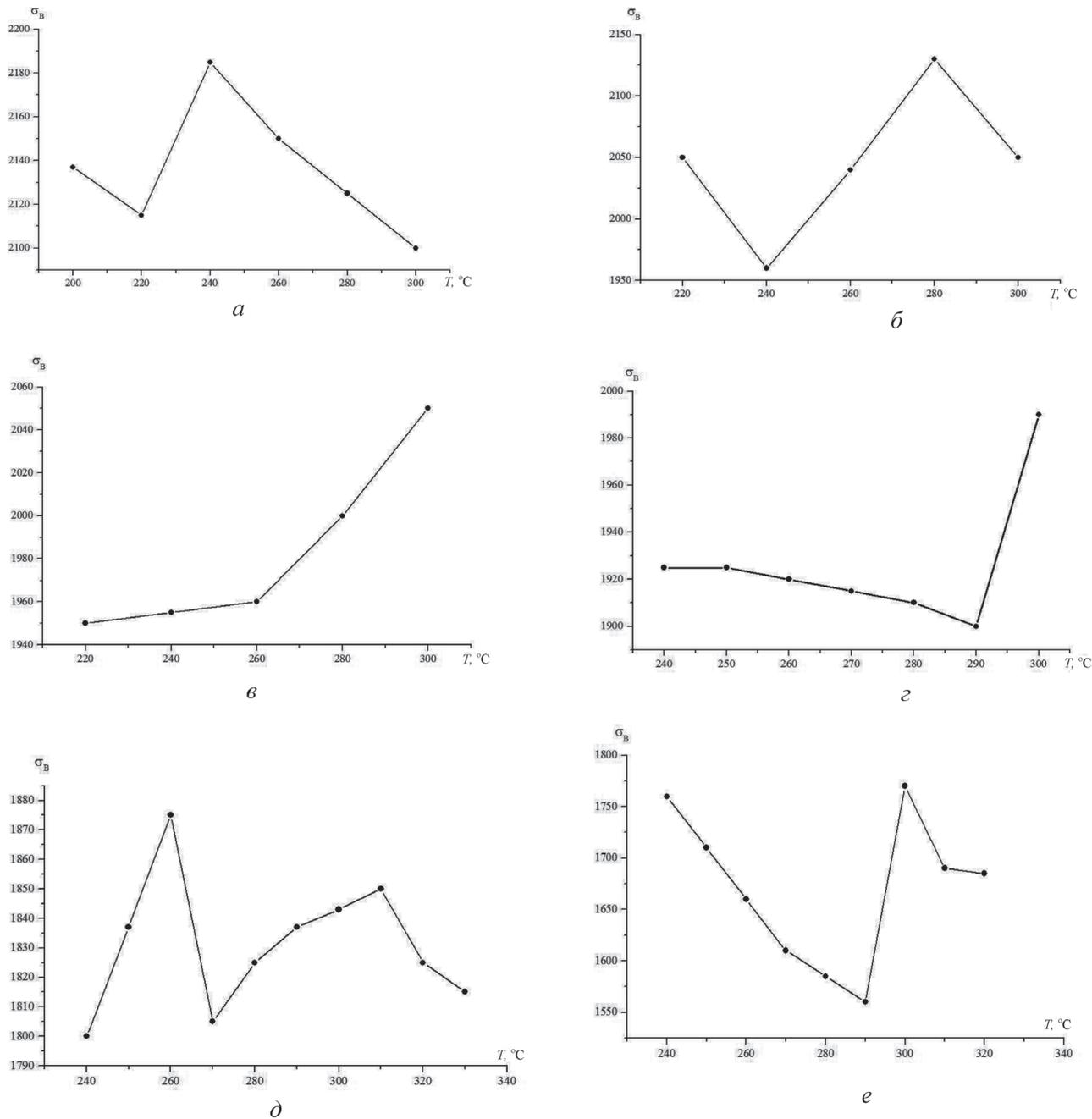


Рис. 2. Влияние температуры замедления скорости нагрева на механические свойства стали 70: а – 400 °С; б – 420; в – 440; г – 460; д – 490; е – 520 °С

1830 МПа, 310 °С – 1850 МПа и 330 °С – 1835 МПа. При температуре  $T_1$ , равной 280 °С, снова зафиксировано разрушение практически при полном отсутствии удлинения образца.

Самая высокая температура нагрева 520 °С (рис. 2, е) приводит к наибольшему падению прочности стали. При повышении  $T_1$  от 240 до 285 °С наблюдается уменьшение  $\sigma_B$  с 1735 МПа до 1565 МПа. Дальнейшее повышение  $T_1$  приводит к возрастанию предела прочности до 1740 МПа при 300 °С с небольшим его уменьшением до 1690 МПа при 320 °С.

Таким образом, из полученных результатов следует, что при нагреве по первой схеме разупрочнение начинается уже при минимальной использованной температуре нагрева – 420 °С (предел прочности уменьшается на 230 МПа) и продолжается до 490 °С. Выше этой температуры в стали развивается, по-видимому, конкурирующий упрочняющий процесс, обуславливающий некоторое повышение предела прочности.

Для анализа влияния увеличения длительности пребывания в более высокотемпературной области нагрева значения предела прочности для одних

Значения предела прочности при нагреве по разным схемам

Схема нагрева	Температура, °C						
	400	420	440	460	490	520	550
Первая		1970		1860	1560	1750	1630
Вторая	2095–2180	1980–2035	1945–2055	1900–1975	1800–1825	1570–1750	

и тех же температур нагрева по разным схемам приведены в таблице.

Из таблицы видно, что для всех температур нагрева по второй схеме, кроме 520 °C, полученные значения больше, чем при нагреве по первой схеме. Исключением являются только одна-две температуры замедления скорости нагрева  $T_1$ , для которых значения  $\sigma_B$  совпадают с соответствующими значениями для первой схемы. Так как при длительности отжига 1,0–1,2 с в первой схеме достигается существенно большее разупрочнение, чем при второй в течение 6–8 с, то можно считать, что увеличение длительности отжига способствует развитию упрочняющих процессов. Эти процессы могут быть связаны с диффузионным перераспределением свободных атомов углерода, образовавшихся при деформации цементитной составляющей перлитной (сорбитной) структуры стали. В результате могут формироваться атмосферы (или облака) атомов углерода на свободных дислокациях, препятствующие их свободному перемещению. Такой механизм характерен для деформационного старения стали, протекающего при повышенной температуре, т. е. для искусственного деформационного старения. Следовательно, при нагреве по первой схеме в области температур 520–550 °C, а при второй – в области температур 400–490 °C возможно активное развитие искусственного деформационного старения, приводящего к существенному возрастанию предела прочности материала.

Исследования стали 80 [2] проводили при нагреве только по первой схеме без замедления скорости нагрева при промежуточной температуре. Была использована скорость нагрева 350 °C/с и изотермическая выдержка в течение 2 с.

Результаты исследования влияния температуры нагрева в области 400 – 550 °C на механические свойства приведены на рис. 3, 4. Значение предела прочности в исходном состоянии было равно  $2550 \pm 150$  МПа. После нагрева до 400 °C оно уменьшилось до 2180 МПа и оставалось на этом же уровне после нагрева до 450 °C. При дальнейшем повышении температуры наблюдалось снижение прочности до 1890 МПа при 500 °C и до 1560 МПа при 550 °C. При этом зависимость разброса значений предела прочности от температуры нагрева имела противоположный вид. Если с увеличением температуры значение  $\sigma_B$  уменьшалось, то интервал разброса этой величины увеличивался. При 400 °C интервал разброса равен 175 МПа, при 450 °C – 215 МПа, а затем практически линейно возрастал до 530 МПа при 550 °C.

Зависимость предела текучести от температуры нагрева (рис. 4) подобна приведенной зависимости для  $\sigma_B$  (см. рис. 3). При исходном значении  $\sigma_T$  для деформированного состояния, равном  $2250 \pm 150$  МПа, при нагреве до температур 400 и 450 °C получены соответственно значения 1995 и 2020 МПа. С повышением температуры наблюдается снижение предела текучести до 1790 и 1520 МПа для

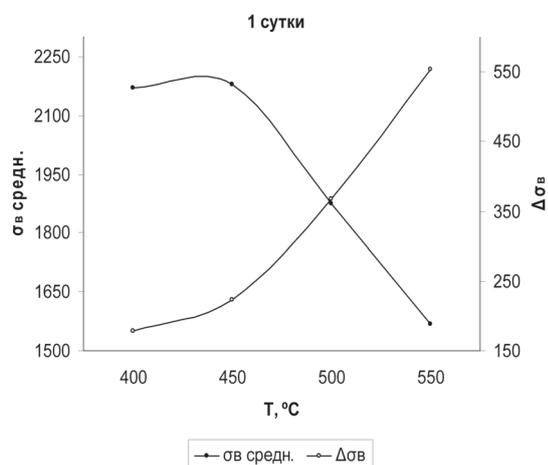


Рис. 3. Зависимость от температуры средней величины и разброса значений  $\sigma_B$  стали 80

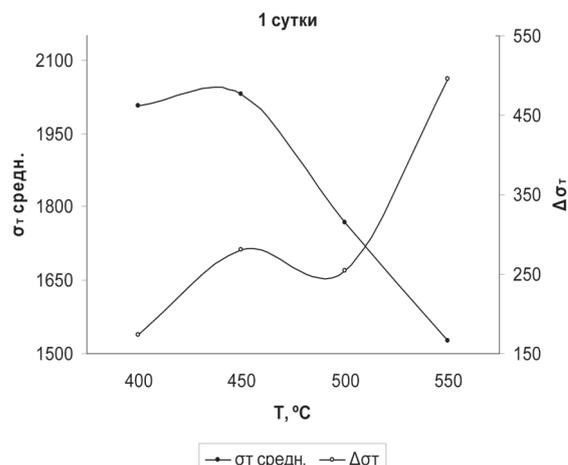


Рис. 4. Зависимость от температуры средней величины и разброса значений  $\sigma_T$  стали 80

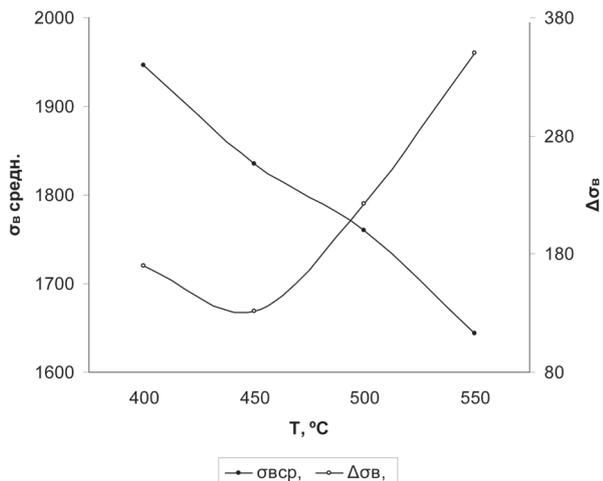


Рис. 5. Зависимость от температуры средней величины и разброса значений  $\sigma_b$  стали 90

температур 500 и 550 °C. Интервал разброса значений  $\sigma_T$  с повышением температуры сначала возрастает (от 165 до 270 МПа), затем несколько снижается (до 250 МПа) и вновь возрастает до 510 МПа при 550 °C.

Аналогичные исследования были проведены для стали 90. В качестве материала для исследований использовали проволоку диаметром 2,45 мм после грубосреднего волочения со степенью деформации 80%. Нагрев осуществляли со скоростью 350 °C/с до температур 400–550 °C с изотермической выдержкой в течение 2 с.

Зависимость предела прочности от температуры нагрева приведена на рис. 5. Его значения монотонно и практически равномерно снижаются с 1950 МПа при 400 °C до 1640 МПа при повышении температуры до 550 °C. Интервал разброса значений минимален при 450 °C и составляет 135 МПа и максимален при самой высокой температуре нагрева – 550 °C. Он равен 357 МПа.

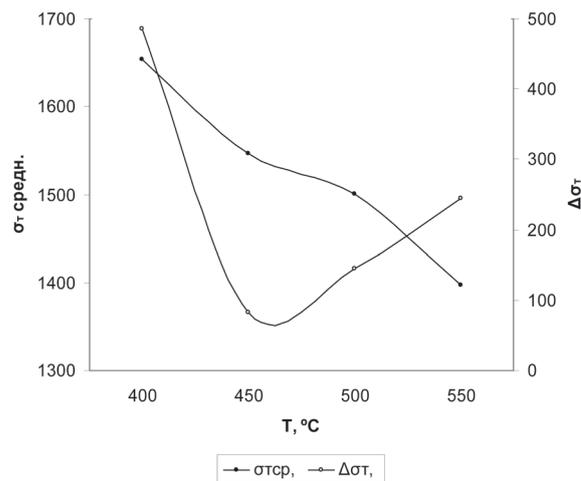


Рис. 6. Зависимость от температуры средней величины и разброса значений  $\sigma_T$  стали 90

Предел текучести (рис. 6) также монотонно уменьшается при повышении температуры нагрева, однако его снижение несколько замедляется в области температур 450–500 °C. Самое высокое значение предела текучести соответствует 400 °C (1664 МПа), самое низкое – 550 °C (1432 МПа).

Разброс значений в отличие от предела прочности максимален при самой низкой температуре, минимален при 450 °C и снова возрастает при дальнейшем повышении температуры нагрева.

Таким образом, из полученных результатов следует, что скоростная термическая обработка в течение даже 1,0–1,5 с может приводить к значительным изменениям прочностных характеристик сильнодеформированной высокоуглеродистой стали. При этом на состояние стали в процессе такой термообработки оказывают влияние скорость нагрева и длительность изотермической выдержки.

### Литература

1. Гордиенко А. И., Крылов-Олефиренко В. В., Мухин Ю. В. Низкотемпературная скоростная термическая обработка сильнодеформированной высокоуглеродистой стали // Сб. тр. Междунар. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». г. Минск, 27–29 марта 2006 г.
2. Гордиенко А. И., Крылов-Олефиренко В. В., Абакумов В. М., Назарова О. И. Скоростной низкотемпературный разупрочняющий отжиг сильнодеформированной высокоуглеродистой стали // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2010. № 2. С. 5–10.