

Глава 18. НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ТРУБ

Вегера И.И., Польшаев А.В.

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, E-mail: smto@tut.by

Введение

В настоящее время металлургические заводы выпускают широкий ассортимент труб, отличающихся назначением, химическим составом, уровнем механических свойств надежностью и долговечностью в процессе эксплуатации. В зависимости от назначения различают следующие основные виды труб: для нефтегазовой промышленности; для машиностроения; для строительства; для трубопроводов; для сосудов и баллонов. По химическому составу стальные трубы изготавливают более чем из 350 марок сталей (низкоуглеродистых, углеродистых, легированных, высоколегированных) а так же множества различных сплавов. Стандарты и технические условия на трубы определяют размеры и технические характеристики труб, химический состав, формы профиля, номинальные и допускаемые пределы отклонений по геометрическим размерам, физико-механические свойства, микроструктуру, внешний вид, правила испытаний, приемки, маркировки, упаковки и транспортировки [1].

По способу производства трубы разделяют на бесшовные и сварные. В настоящее время объемы производства сварных и бесшовных труб практически одинаковы. Благодаря развитию технологий в области сварки, сварные трубы по своим свойствам, прежде всего по уровню прочности практически не уступают бесшовным. Автоматизация поточного производства позволяет снизить затраты и стоимость сварных труб. Вместе с тем следует иметь в виду, что отдельные виды труб (например, толстостенные) технологически могут изготавливаться только бесшовными. В связи с этим произошло разделение сфер применения данных видов труб, так например трубы для магистральных трубопроводов изготавливают электросваркой с прямым или спиральным швом [2]. Нефтегазовые трубы (обсадные, бурильные, насосно-компрессорные) изготавливают бесшовными. Трубы для теплоэнергетических установок из углеродистых, легированных и высоколегированных (коррозионностойких и жаростойких) сталей выпускают бесшовными. Трубы для химической промышленности используются в различных аппаратах и установках, и в зависимости от условий эксплуатации они также могут быть бесшовными или сварными. В машиностроении, авиации, автотракторостроении, в строительстве и других отраслях народного хозяйства широко используются конструкционные трубы из разных сталей, цветных металлов и сплавов, которые тоже изготавливают бесшовными или сварными.

Бурное развитие различных отраслей промышленности в особенности нефтегазовой, строительной и машиностроительной вызвало тенденцию к наращиванию производства высокопрочных труб. Повышение прочностных характеристик трубных сталей достигается двумя путями, с помощью микролегирования и использованием упрочняющей термической обработки. Согласно литературным данным основными легирующими элементами в трубных сталях являются марганец, кремний, хром [3]. Для увеличения прочностных свойств без снижения вязкости и ухудшения свариваемости низкоуглеродистые стали микролегируют введением добавок ванадия, ниобия, молибдена, титана и азота. Данные микродобавки позволяют реализовать принципы карбидного или карбонитридного упрочнения, а так же положительно влияют на измельчение зеренной структуры благодаря образованию мелкодисперсных карбидов [4]. Необходимо отметить, что данный способ упрочнения приводит к удорожанию конечной продукции, а так же он имеет ограничение по достигаемому уровню прочности труб.

Достижение высокого уровня прочностных свойств возможно лишь за счет применения упрочняющей термической обработки. Термическая обработка является важнейшей составляющей в современной технологии производства труб. Ее применяют для достижения определенных физико-механических свойств; подготовки структуры; восстановления пластичности и выравнивания структуры и свойств сварных

труб. Основными видами термической обработки труб являются отжиг, нормализация, нормализация и отпуск, закалка, закалка и отпуск. Чаще всего при производстве горячекатаных труб применяют отжиг и нормализацию. Для получения труб высоких групп прочности и сохранения пластических характеристик их подвергают термической обработке, включающей закалку и высокий отпуск. Применение термоупрочненных труб позволяет повысить их механические свойства или снизить массу металла до 30%. Термическое упрочнение горячекатаных труб включает нагрев в аустенитную область, изотермическую выдержку, закалку в воде и последующий высокий отпуск. Температуру нагрева под закалку и отпуск выбирают в зависимости от химического состава сталей и исходя из необходимого уровня механических свойств регламентированного действующими международными и отечественными стандартами.

Для нагрева горячекатаных труб под закалку или нормализацию в промышленности используются печи проходные с роликовым подом, проходные с шагающими балками, камерные и очень редко вакуумные. Так, например, на Белорусском металлургическом заводе для нагрева под нормализацию и закалку используется проходная газовая печь с шагающими балками. Печь позволяет нагревать трубы длиной от 6 до 15 метров, диаметром от 32 до 168,3 мм с толщиной стенки 2,5–19 мм. Трубы подаются в печь поштучно через печной рольганг в автоматическом или ручном режиме. Закалочная печь нагревается природным газом. Температуру нагрева труб на выходе из печи можно регулировать в пределах 700–1050°C. Отклонение от установленной в технологической карте температуры по зонам печи не должно превышать $\pm 10^\circ\text{C}$. Достоинством печей с шагающими балками является возможность эффективного регулирования температуры и времени выдержки в процессе нагрева и поштучной выдачи труб под закалку или нормализацию. Отпуск закаленных или нормализованных труб производят в аналогичной проходной газовой печи с шагающим подом с температурой нагрева в пределах 350–800°C.

Необходимо отметить, что применение традиционных, газопламенных видов нагрева под термообработку труб связано с определенными недостатками это, прежде всего низкий КПД нагрева, окисление и обезуглероживание поверхности, необходимость применения дорогостоящих материалов для периодического регламентного ремонта печи. Кроме того, газовые печные агрегаты тяжело встраиваются в различные производственные линии.

В связи с этим технологические процессы и оборудование термической обработки труб постоянно совершенствуются в направлении применения новых видов нагрева и полной автоматизации процесса. В настоящее время наиболее перспективным видом нагрева для данной области является скоростной индукционный нагрев, обладающий высоким КПД за счет введения энергии непосредственно в толщу металла. Индукционный нагрев традиционно применяется для локального, объемного и поверхностного нагрева различных заготовок. Возможность подвода высоких удельных мощностей и компактные размеры, позволяет встраивать индукционные нагреватели непосредственно в линию производства труб. С помощью индукционного нагрева, можно контролировать процесс подъема температуры металла и осуществлять любой желаемый график нагрева, добиваясь высокого качества конечного изделия и исключить обезуглероживание и окисление поверхности. Кроме того, индукционный нагрев имеет неоспоримые преимущества перед печным, при термообработке высоколегированных сталей и сплавов требующих нагрева под закалку до температур 1200°C и выше, а так же при его применении для локального отжига сварных швов.

Удельный вес индукционного нагрева металла под термическую обработку и деформацию неуклонно растет. Так, например, в странах европейского союза в планы развития промышленного производства [5] включены задачи по массовому вытеснению видов нагрева, связанных с использованием добываемых углеводородов в качестве топлива.

Однако темпы применения индукционного нагрева сдерживаются отсутствием данных по оптимальным режимам скоростной термической обработки трубных сталей, по кинетике фазовых и структурных превращений в них в условиях скоростного нагрева, а так же о характере изменения механических свойств в зависимости от температуры, скорости и времени нагрева и охлаждения. Кроме того для реализации новых процессов требуется разработка и изготовление автоматизированного оборудования.

В данной главе будут представлены результаты исследований влияния режимов скоростного нагрева и охлаждения на структуру и свойства среднеуглеродистых легированных сталей широко используемых при производстве насосно-компрессорных труб нефтегазового сортамента, а так же труб изготовленных из высоколегированных коррозионностойких сталей. Будет показана кинетика протекания фазовых и структурных превращений в сталях в условиях скоростного нагрева. Приведены результаты моделирования и расчетов возможности применения скоростного индукционного нагрева в качестве перспективной технологии термической обработки горячекатаных бесшовных труб с целью повышения их механических свойств в соответствии с требованиями зарубежных и отечественных нормативных документов (API 5CT, API 5L, DIN EN10297, DIN EN 10216) по различным группам прочности.

Методы исследований

В качестве объекта исследования были выбраны сталь 32Г2 широко применяемая для производства высокопрочных обсадных, насосно-компрессорных и бурильных труб наряду с другими сталями данного класса 35Г2С, 37Г2С, 40Г и др. В качестве примера высоколегированной коррозионностойкой стали была выбрана наиболее широко используемая сталь AISI 304 (08X18H10).

Образцы для исследований вырезали из труб в продольном направлении и подвергали термической обработке в камерной печи СНОЛ 30/1100 и для сравнения скоростной термообработке с применением специальной установки электроконтактного нагрева, позволяющей моделировать скорости нагрева в пределах 1-1000°С/с и скорости охлаждения в интервале 1-400°С/с. Линейность нагрева обеспечивалась при помощи тиристорного регулятора РН-250, включенного в первичную обмотку трансформатора ОСУ-40. Регистрацию температуры осуществляли ХА-термопарами, начеканенными в каждый нагреваемый образец, в комплекте с быстродействующим пирометром КСП-4. Отключение нагрева и сброс образцов в закалочную среду осуществлялся автоматически по мере достижения заданной температуры или после определенной выдержки при заданной температуре.

Разрыв образцов проводили на машине ZD 10/90. Скорость нагружения составляла 10 мм/мин. После разрыва определяли предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и сужение. Испытание на ударную вязкость при комнатной и пониженной температуре проводили на маятниковом копре PSWO-30.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследование влияния режимов печного нагрева и охлаждения на структуру и механические свойства стали 32Г2

Образцы для исследований размером 10x10x100 мм вырезали из горячекатаных труб в продольном направлении и подвергали термической обработке в камерной печи по следующим режимам: нагрев до температур 750-950°С, закалка в воде, нормализация при температурах 750-950°С.

В исходном состоянии микроструктура стали 32Г2 после горячей прокатки, представляет собой феррито-перлитную смесь с размерами перлитных зерен 15-20 мкм и выделениями феррита по границам (рис.1,а). Механические свойства стали 32Г2 после горячей прокатки находились на уровне: $\sigma_b=672$ МПа; $\sigma_{0,2}=428$ МПа; $\delta=21\%$; $\psi=65\%$. После нагрева стали 32Г2 до температуры 750°С и закалки в воде были получены следующие механические свойства: $\sigma_b=1566$ МПа; $\sigma_{0,2}=1540$ МПа; $\delta=1\%$; $\psi=5,4\%$ (рис.2). Дальнейшее повышение температуры нагрева от 800 до 850°С приводит к росту временного сопротивления на разрыв, предела текучести,

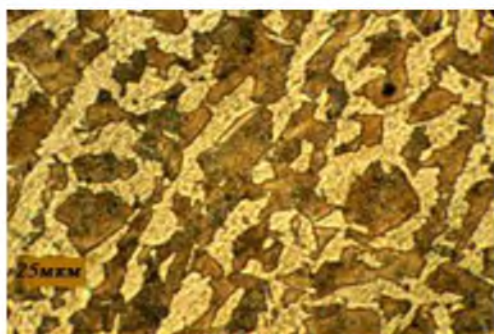
относительного удлинения и относительного сужения закаленной стали от $\sigma_b=1580$ МПа; $\sigma_{0,2}=1560$ МПа; $\delta=2,5\%$; $\psi=12\%$ до $\sigma_b=1883$ МПа; $\sigma_{0,2}=1658$ МПа; $\delta=4,7\%$; $\psi=38,3\%$. После закалки с температур 850-875°C фиксируется мартенсит с твердостью 52 HRC (рис.1,б). Следует отметить, что после закалки в интервале температур 825-875°C наблюдается повышение относительного сужения с 23 до 36,5%. Данное обстоятельство может быть связано с протеканием процессов рекристаллизации аустенита, измельчением зерен и гомогенизацией твердого раствора.

Если после нагрева до температур 750-850°C горячекатаные образцы охлаждали на воздухе (то есть моделировали процесс нормализации), то механические свойства стали 32Г2 во всем температурном интервале практически не изменялись и находились на уровне: $\sigma_b=650-660$ МПа; $\sigma_{0,2}=375-400$ МПа; $\delta=18-22\%$; $\psi=67-70\%$. При этом структура стали, нагретой до температуры 850°C представляла собой феррито-перлитные зерна размером 8-10 мкм, более мелкие, чем после горячей прокатки (рис.1,в). Данное обстоятельство обусловлено протеканием процессов растворения феррита и последующим распадом аустенита на феррито-цементитную смесь, структура и свойства которой в основном зависит от скоростей охлаждения исследуемых образцов.

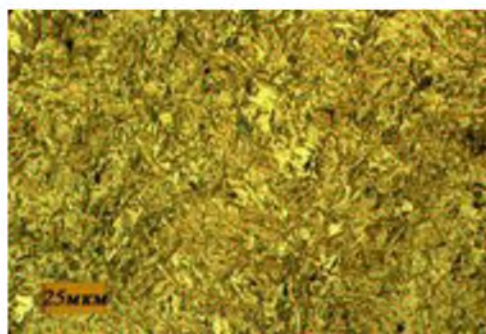
Исследование влияния режимов скоростного нагрева и охлаждения на структуру и механические свойства стали 32Г2

Для сравнительного анализа образцы размером 10x10x100 мм вырезали из горячекатаных бесшовных труб в продольном направлении и подвергали скоростной термической обработке на специальной установке электроконтактного нагрева. Нагрев образцов осуществляли по следующим режимам: нагрев до температур 800-1000°C, закалка в воде; нормализация при температурах 750-900°C. Из термически обработанных образцов изготавливали образцы для механических испытаний.

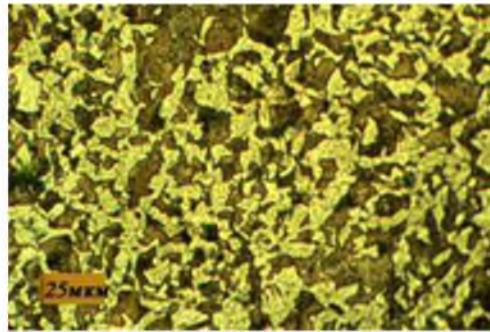
После скоростного нагрева $V_n=50^\circ\text{C}/\text{с}$ до температуры 750°C и закалки в воде были получены следующие механические свойства стали 32Г2: $\sigma_b=1550$ МПа; $\sigma_{0,2}=1490$ МПа; $\delta=1\%$; $\psi=5\%$ (рис.3). Дальнейшее повышение температуры нагрева до 850°C приводит к плавному росту временного сопротивления на разрыв, предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения закаленной стали до $\sigma_b=1620$ МПа; $\sigma_{0,2}=1540$ МПа; $\delta=2,5\%$; $\psi=8\%$. Максимальные прочностные и пластические свойства стали 32Г2: $\sigma_b=1870$ МПа; $\sigma_{0,2}=1790$ МПа; $\delta=4,5\%$; $\psi=20\%$, были получены после закалки с температуры 950°C. Необходимо отметить, что данный уровень свойств сопоставим со свойствами, полученными после печной закалки с температуры 850°C. Кроме того было установлено, что все процессы связанные с протеканием фазовых и структурных превращений в стали 32Г2 и формированием определенного уровня свойств в условиях скоростного нагрева смещаются на 50-100°C вверх по температурной шкале. В том случае если после скоростного нагрева с температур 750-900°C образцы стали 32Г2 охлаждали на воздухе, то механические свойства во всем температурном интервале незначительно увеличивались с ростом температуры в следующих диапазонах: $\sigma_b=650-720$ МПа; $\sigma_{0,2}=430-500$ МПа; $\delta=24-27\%$; $\psi=64-67\%$.



а

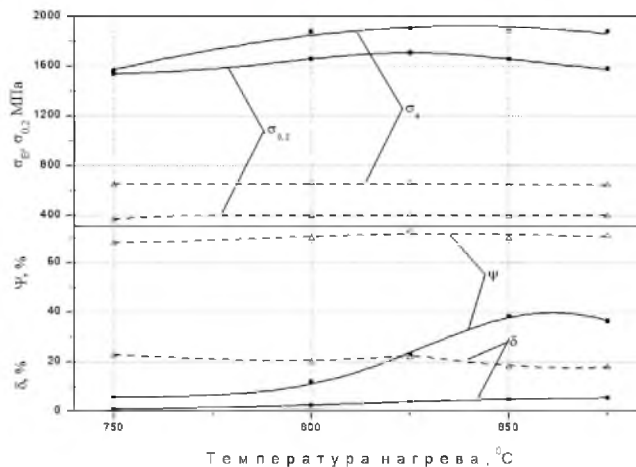


б



В

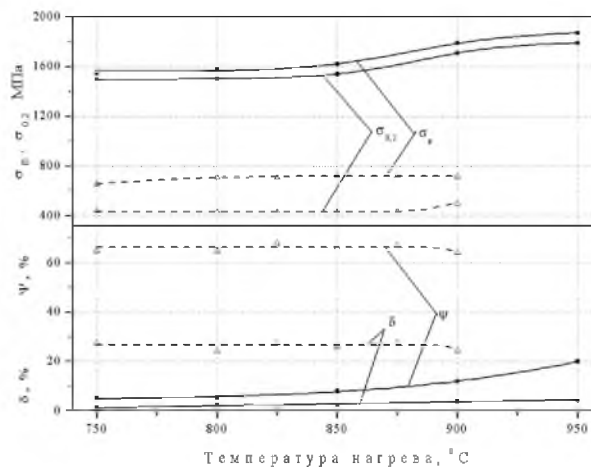
а – после горячей прокатки; б – 850⁰С, охлаждение в воде; в – 850⁰С, охлаждение на воздухе
Рисунок 1 – Микроструктура стали 32Г2 после печного нагрева



нагрев в печи 1 ч, охлаждение в воде (сплошная линия);
охлаждение на воздухе (штриховая линия).

Рисунок 2 – Механические свойства стали 32Г2 после печного нагрева

Сравнивая свойства, полученные после нормализации со скоростного нагрева, было установлено, что прочностные свойства стали увеличиваются на 50-80 МПа, а пластические свойства на 3-5% по сравнению со свойствами после печной нормализации. Данное обстоятельство, по-видимому, связано с получением более мелкой зеренной структуры стали за счет сокращения времени пребывания материала при высоких температурах. Микроструктура стали после нормализации со скоростного нагрева существенно не отличалась от полученной после печного нагрева и представляла собой феррито-перлитную смесь.



Скоростной нагрев $V_n=50^0\text{C}/\text{с}$ охлаждение в воде (сплошная линия);
охлаждение на воздухе (штриховая линия)

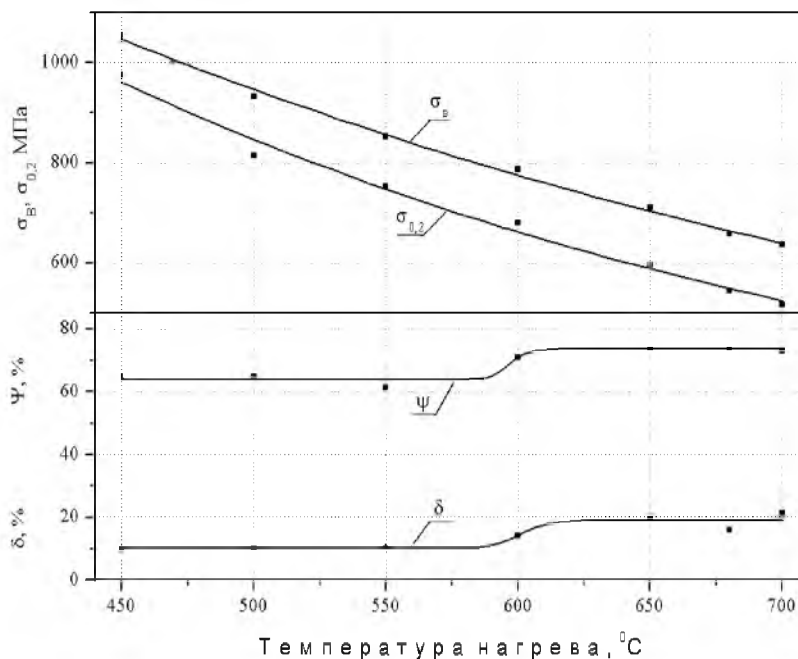
Рисунок 3 – Механические свойства стали 32Г2 после скоростного нагрева

Исследование влияния режимов отпуска на структуру и механические свойства закаленной и нормализованной стали 32Г2 после печного нагрева

Образцы стали 32Г2 для исследований нагревали до температуры 850°C, закаливали в воде, а затем подвергали отпуску при температурах 450-700°C в течение 2 ч. Результаты испытаний на растяжение представлены на рисунке 4. Исследованиями установлено, что после закалки с 850°C и отпуска при температуре 450°C, 2 ч механические свойства стали 32Г2 следующие: $\sigma_b=1055$ МПа; $\sigma_{0,2}=977$ МПа; $\delta=9,8\%$; $\psi=65\%$. С повышением температуры отпуска от 450 до 550°C прочностные характеристики плавно снижаются до $\sigma_b=855$ МПа; $\sigma_{0,2}=754$ МПа; $\delta=10,6\%$; $\psi=61,4\%$. Пластические характеристики в данном интервале температур отпуска не изменяются и составляют $\delta=9,8-10\%$; $\psi=61-65\%$. После отпуска при температурах 600-700°C, предел прочности и предел текучести снижаются от $\sigma_b=787$ МПа, $\sigma_{0,2}=680$ МПа до $\sigma_b=637$ МПа, $\sigma_{0,2}=517$ МПа, пластические свойства повышаются от $\delta=14,3\%$, $\psi=71\%$ до $\delta=20-21,3\%$, $\psi=74\%$. Микроструктура стали 32Г2 после закалки с температуры 850°C и отпуска при 650°C представляет собой ферритную матрицу, внутри которой равномерно распределены мелкодисперсные частицы цементита (рис.5,а,б).

Механические свойства стали 32Г2 после печной нормализации с температуры 850°C и отпуска приведены в таблице 1. С повышением температуры отпуска от 600 до 700°C временное сопротивление на разрыв и предел текучести снижаются от 646 и 424 МПа до 573 и 350 МПа соответственно, а относительное удлинение возрастает с 21,6 до 26,4%, относительное сужение не изменяется и находится на уровне 71%.

После нормализации при 850°C и отпуска при 650°C в стали формируется феррито-перлитная структура (рис.5,в,г). Причем внутри ферритных зерен в процессе отпуска происходит выделение мелкодисперсных частиц цементита, а в перлитных объемах их частичная коагуляция.



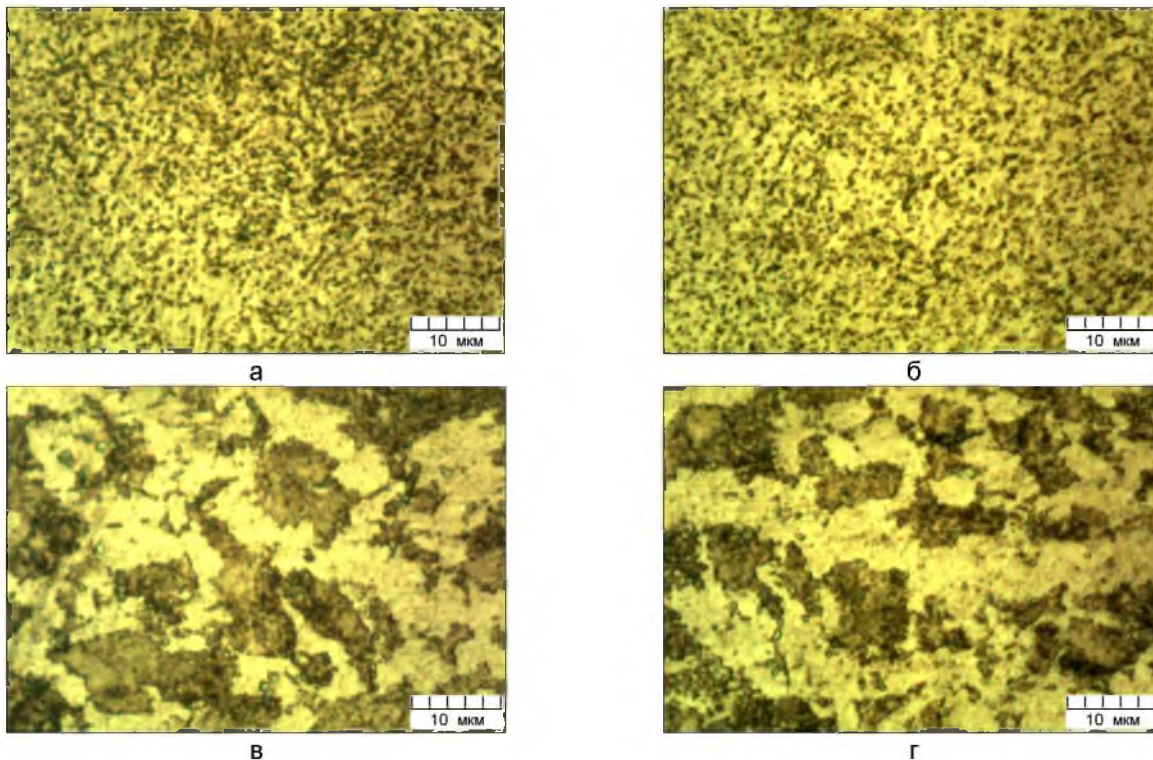
Режимы термообработки: нагрев 850°C, 1 ч, охл. вода, отпуск 2 ч, охл. воздух.
Рисунок 4 – Механические свойства стали 32Г2 после печной закалки и отпуска

Таблица 1 - Механические свойства стали 32Г2 после печной нормализации и отпуска

Температура нормализац.	Охлажд. среда	Температура отпуска	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относитель. удлин./сужен.
850	воздух	600	424	646	21,6 / 71
850	воздух	650	382	612	21,1 / 72
850	воздух	700	350	573	26,4 / 71

Исследование влияния режимов отпуска на структуру и механические свойства закаленной со скоростного нагрева стали 32Г2

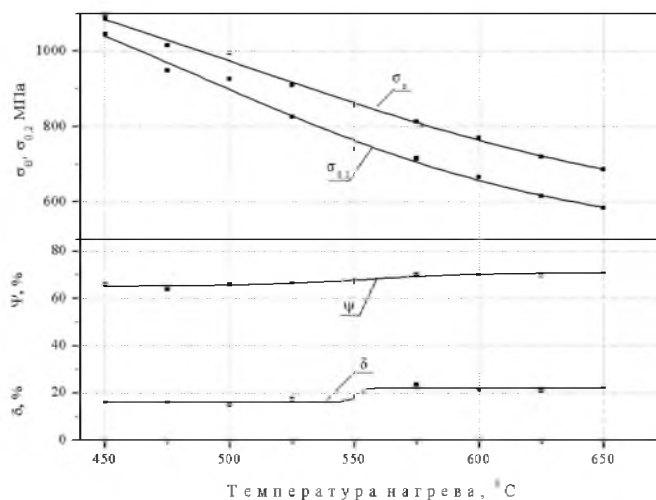
Для сравнительного анализа образцы стали 32Г2 нагревали со скоростью 50 °С/с до температуры 900°С, закаливали в воде, а затем подвергали отпуску при температурах 450-650°С в течение 2 ч. Испытания на растяжение образцов стали 32Г2 после скоростной термообработки представлены на рисунке 6. Установлено, что после скоростной закалки с 900°С и отпуска при температуре 450°С, механические свойства стали 32Г2 находятся на уровне: $\sigma_b=1090$ МПа; $\sigma_{0,2}=1040$ МПа; $\delta=16\%$; $\psi=66\%$. С повышением температуры отпуска до 500°С прочностные характеристики плавно снижаются до $\sigma_b=995$ МПа; $\sigma_{0,2}=920$ МПа, а пластические не изменяются и остаются на прежнем уровне. После отпуска при температуре 600°С предел прочности и предел текучести снижаются до $\sigma_b=770$ МПа, $\sigma_{0,2}=665$ МПа, пластические свойства повышаются до $\delta=22\%$, $\psi=70\%$. В дальнейшем при повышении температуры отпуска до 650°С прочностные характеристики стали линейно снижаются до $\sigma_b=690$ МПа; $\sigma_{0,2}=585$ МПа, а пластические характеристики увеличиваются до максимального значения $\delta=23\%$; $\psi=71,3\%$. Таким образом, показано, что после закалки стали 32Г2 со скоростного нагрева и отпуска механические свойства стали повышаются по сравнению с печным нагревом. После скоростного нагрева до 900°С с последующим охлаждением в воде и отпуском при 450°С микроструктура стали 32Г2 представляет собой отпущенный мартенсит с выделениями мелкодисперсные частицы цементита (рис.7,а). Кроме того необходимо отметить, что в результате кратковременного пребывания стали в области закалочных температур в условиях скоростного нагрева полной гомогенизации стали не происходит, поэтому в структуре стали отмечаются участки с не полностью протекшими фазовыми превращениями.



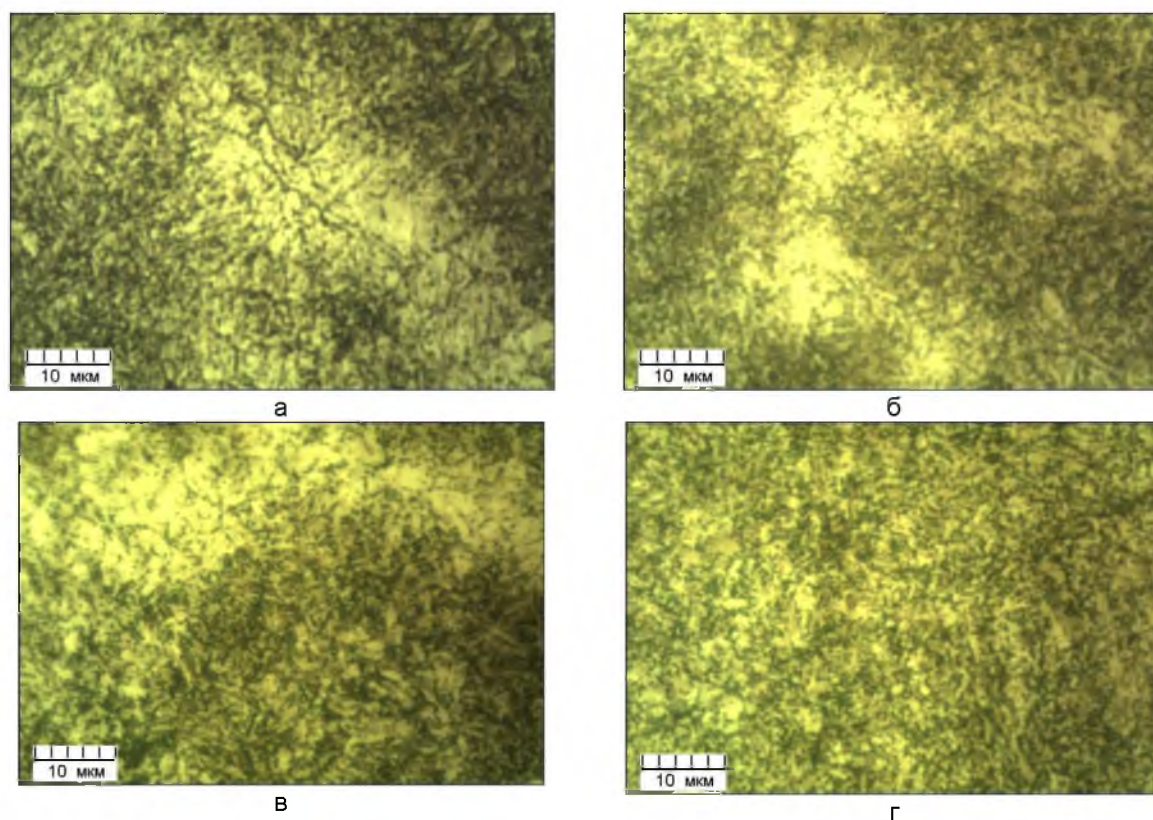
а, б – 850°С 1 ч вода + 650 °С, 2 ч; в, г – 850°С 1 ч воздух + 650°С 2 ч.

Рисунок 5 – Микроструктура стали 32Г2 печной закалки, нормализации и отпуска

Данные участки в структуре особенно четко проявляются на бывших границах зерен аустенита. При повышении температуры отпуска в структуре стали происходит дальнейший распад мартенсита с выделением карбидной фазы и ее коагуляция (рис.7,б,в). После отпуска при температуре выше 600°С формируется ферритная структура с равномерно распределенными в ней мелкодисперсными частицами цементита (рис.7,г).



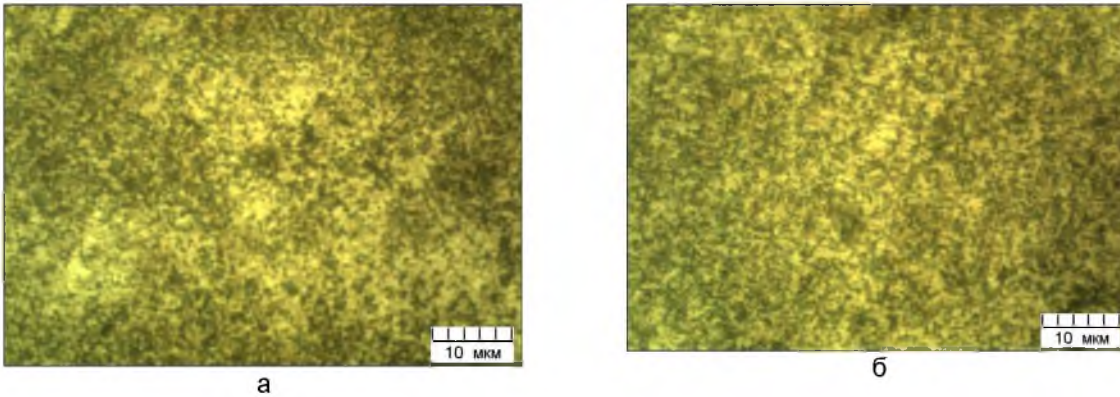
Режимы: скоростной нагрев 900°С ($V_H=50^{\circ}\text{C}/\text{c}$), охл. вода, отпуск 2 ч, охл. воздух.
Рисунок 6 – Механические свойства стали 32Г2 после скоростного нагрева и отпуска



Скоростной нагрев ($V_H=50^{\circ}\text{C}/\text{c}$) 900°С, охл. вода, отпуск 2 ч, охл. воздух.
а– 450°С; б – 500°С; в – 550°С; г – 600°С.

Рисунок 7 – Микроструктура стали 32Г2 скоростного нагрева и отпуска

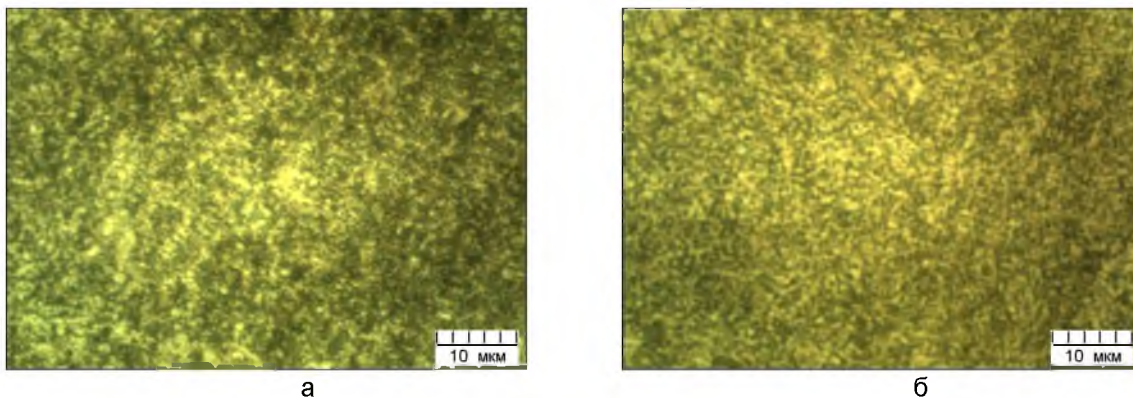
С целью гомогенизации структуры стали 32Г2 образцы нагревали со скоростью 50°С/с до температуры 950-1000°С, закаливали в воде, а затем подвергали отпуску при температурах 600-650°С в течение 2 ч. Результаты исследований показали, что после закалки стали с температуры 950°С и отпуска 600 и 625°С процессы фазовых превращений и перераспределения углерода проходят более полно (рис.8,а,б). При этом свойства стали остаются на уровне $\sigma_B=730-770$ МПа, $\sigma_{0,2}=630-660$ МПа, $\delta=22-23\%$, $\psi=70-71\%$ для температур отпуска 600 и 625°С соответственно.



а
б
Скоростной нагрев ($V_H=50^\circ\text{C}/\text{c}$) 950°C , охл. вода, отпуск 2 ч, охл. воздух.
а– 600°C ; б – 625°C .

Рисунок 8 – Микроструктура стали 32Г2 скоростного нагрева и отпуска

Дальнейшее повышение температуры закалки до 1000°C приводит к более полной гомогенизации структуры стали (рис.9,а,б), однако ее свойства несколько снижаются $\sigma_b=720-750$ МПа, $\sigma_{0,2}=600-630$ МПа, $\delta=20-22\%$, $\psi=69-70\%$ для температур отпуска 600 и 625°C соответственно. В связи с этим были сделаны выводы о том, что оптимальная температура скоростного нагрева под закалку находится в интервале $920-950^\circ\text{C}$. Кроме того для получения гомогенной структуры стали рекомендуется делать изотермические выдержки при закалочной температуре. Для этих целей в промышленных индукционных установках применяют индуктора термостаты.

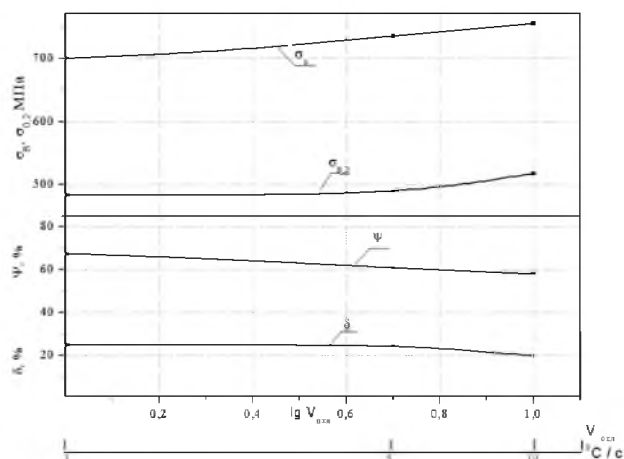


а
б
Скоростной нагрев ($V_H=50^\circ\text{C}/\text{c}$) 1000°C , охл. вода, отпуск 2 ч, охл. воздух.
а– 600°C ; б – 625°C .

Рисунок 9 – Микроструктура стали 32Г2 скоростного нагрева и отпуска

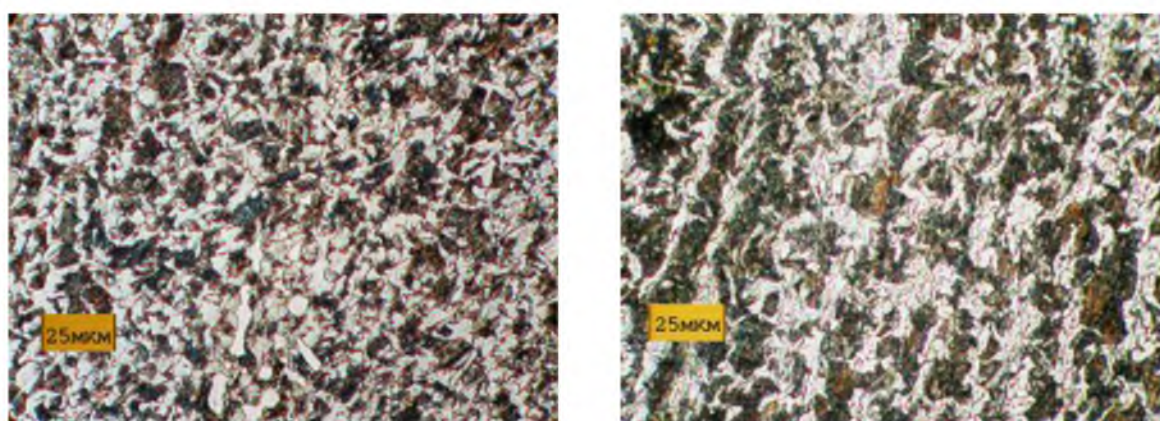
Влияние режимов охлаждения в процессе нормализации на механические свойства и структуру стали 32Г2

Известно, что на формирование зеренной и внутривзеренной структуры стали 32Г2 в процессе нормализации, а также на ее механические свойства в большей степени оказывают условия охлаждения. Вследствие этого целесообразно было изучить влияние скоростей охлаждения на структуру и свойства стали 32Г2 после нагрева до температуры нормализации. Для этого образцы подвергали нагреву до температуры 900°C , а затем охлаждали в интервале температур $850-300^\circ\text{C}$ на воздухе ($V_{ох}=10^\circ\text{C}/\text{c}$) или со скоростями 5 и $1^\circ\text{C}/\text{c}$. Скорости охлаждения 1 и $5^\circ\text{C}/\text{c}$ обеспечивали в результате дозированного пропускания тока через образец. После термической обработки проводили механические испытания образцов, результаты, которых представлены на рисунке 10. Из приведенных данных было установлено, что с уменьшением скорости охлаждения от 10 до $1^\circ\text{C}/\text{c}$ временное сопротивление на разрыв снижалось от 755 до 698 МПа, предел текучести от 517 до 460 МПа, а относительное удлинение повышалось от 20 до 24% . Анализ микроструктуры показал (рис.11), что с уменьшением скорости охлаждения до 5 и $1^\circ\text{C}/\text{c}$ наблюдается увеличение среднего размера ферритной составляющей от 5 до 7 мкм.



Нормализация 900°C

Рисунок 10 – Механические свойства стали 32Г2, в зависимости от скорости охлаждения



а б

Нагрев 900°C: а – охлаждение 5°C/с; б – охлаждение 1°C/с.

Рисунок 11 – Микроструктура труб изготовленных из стали 32Г2 после различных скоростей охлаждения

Рекомендации по режимам термообработки и механическим свойствам обсадных и насосно-компрессорных труб, изготовленных из стали 32Г2

По результатам проведенных исследований были сделаны рекомендации по режимам печной и скоростной термической обработки стали 32Г2 для различных групп прочности труб в соответствии с действующей нормативной документацией. Рекомендуемые режимы термической обработки и механические свойства, которые они обеспечивают для их достижения (по ГОСТ 633-80 и стандарту API 5CT), приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы ТО, мех.свойства стали 32Г2 и классы прочности

Темп. нагрева	Охл. среда	Темп. отпуска	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относит. Удлинение/сужение	Класс прочности по ГОСТ 633-80	Группа Прочности По API 5CT
Печной нагрев							
860	вода	450	977	1055	9,8 / 65	Р	Q125
860	вода	500	814	933	9,9 / 65	М	P110
860	вода	550	754	853	10,6 / 61,4	М	P110
860	вода	600	680	787	14,3 / 71	Л	T95
860	вода	650	596	711	20,0 / 74	К, Е	N80
860	вода	680	545	658	16 / 73,6	Д исп А, Б	K55
825	воздух	-	663	408	21,8 / 73	Д исп А, Б	J55, N40

Продолжение таблицы 2

Скоростной нагрев 50°C/с							
950	вода	450	1045	1090	16 / 65	Р	Q125
950	вода	500	930	1000	16 / 65	Р	Q125
950	вода	550	745	860	18 / 67	М	P110
950	вода	600	665	770	21 / 71	Л	T95
950	вода	625	630	730	22 / 71	Е	N80
950	вода	650	580	690	23 / 72	К	N80

Проведенные исследования по влиянию температуры нагрева, режимов охлаждения и температуры отпуска на структуру и механические свойства горячекатаных труб, изготовленных из стали 32Г2 показали, что трубы, изготовленные из стали 32Г2, после закалки с отпуском либо нормализации, обеспечивают необходимый уровень механических свойств в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 633-80 и API 5CT. Применение скоростного нагрева для термообработки стали 32Г2, позволяет получить более высокие свойства по сравнению с аналогичной печной термической обработкой, при сокращении времени нагрева, исключении окисления, угара и обезуглероживания металла.

Исследование процессов термообработки высоколегированной коррозионностойкой стали AISI 304

Трубопроводы в химических и теплоэнергетических установках, а так же установках работающих под давлением представляют объекты повышенной опасности. Повреждения даже отдельных частей перечисленного оборудования могут привести к тяжелым последствиям. Стали и сплавы, применяемые для изготовления данных объектов, должны иметь хорошую свариваемость, высокие прочностные и пластические свойства, которые обеспечивали бы надежную эксплуатацию на протяжении расчетного срока службы [6]. Из данных материалов с применением сварки, штамповки, вальцовки или фланжирования изготавливают как сами сосуды, так отдельные их части. Самой распространенной сталью применяемой для этих целей является сталь AISI 304 (08X18H10)

Сталь AISI 304 может находиться как в термически обработанном состоянии, так и в горячекатаном. В состоянии поставки механические свойства стали не должны быть ниже значений, указанных в таблице 3.

Таблица 3 – Механические свойства стали AISI 304 по ГОСТ 7350

Нормативный документ ГОСТ 7350	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU ₊₂₀ , Дж/см ²	KCU ₋₄₀ , Дж/см ²
08X18H10х/к	510	205	43	-	75-93	78-93
08X18H10г/к	510	205	43	-	187-206	184-301

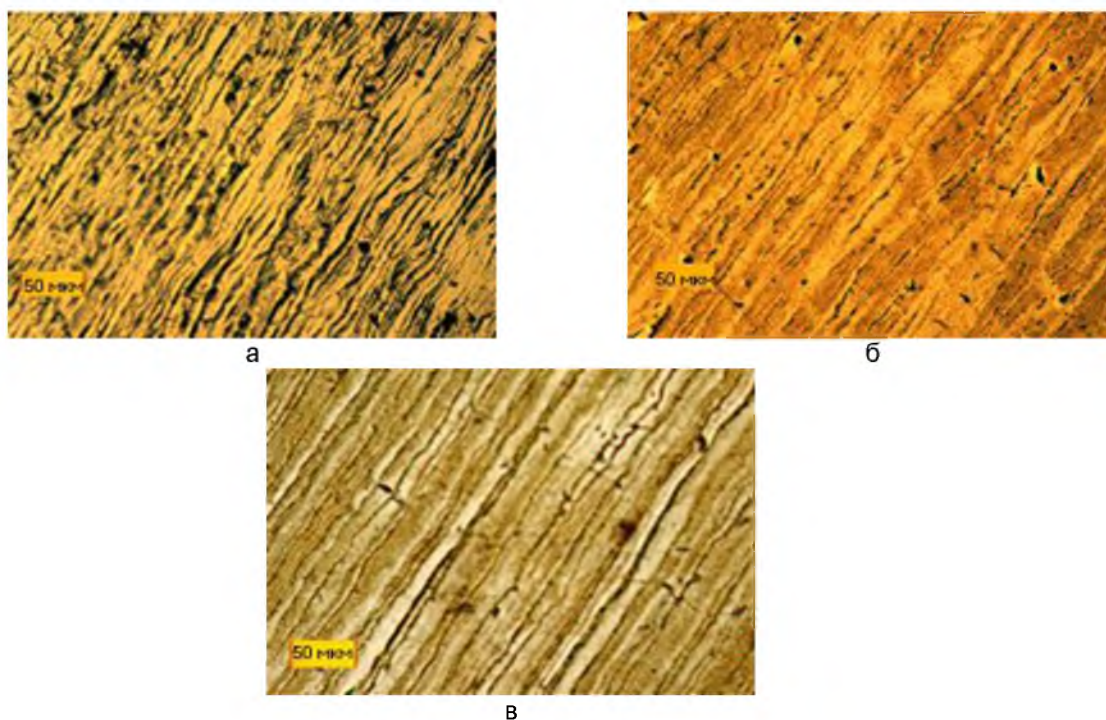
После холодной деформации связанной с формообразованием, прочностные и пластические характеристики стали претерпевают существенные изменения. Поэтому для их восстановления до соответствующего уровня требуется проведение термической обработки. Для исследований использовали образцы стали, претерпевшие холодную штамповку и фланжирование. В таблице 4 приведены физико-механические свойства стали после холодной деформации.

Таблица 4 – Механические свойства деформированной стали AISI 304

	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU ₊₂₀ , Дж/см ²	KCU ₋₄₀ , Дж/см ²
фланжированный	809	675	26,4	67	195	206
Штампованный без феррита	750	572	41,4	67	213	173
Штампованный с ферритом	800	622	40	73	192	208

Исследование структуры стали AISI 304 в местах штамповки показало, что в исходном деформированном состоянии структура металла (рис.12,б) представляет собой зерна аустенита вытянутые в направлении прокатки. В случаях, когда металл поставляется в горячекатаном состоянии, в результате распада аустенита в процессе охлаждения листов на воздухе по границам аустенита происходит выделение ферритных и карбидных мелкодисперсных частиц (рис.12,в), что вызывает дополнительное упрочнение.

В дальнейшем с целью снижения прочностных свойств стали претерпевшей холодную деформацию образцы, нагревали в камерной печи СНОЛ 30/1100 последующим режимам: нагрев до температур 300-1050⁰С, выдержка при заданной температуре 30 мин, с последующим охлаждением в воде, на воздухе или с печью до 350⁰С, а затем на воздухе. После термической обработки образцы испытывали на разрыв и на ударную вязкость.



а – фланжированный, б – штампованный без феррита, в – штампованный с ферритов.
Рисунок 12 – Микроструктура стали AISI 304 после холодной деформации

Образцы после штамповки, имели следующие механические свойства: $\sigma_b=750-800$ МПа; $\sigma_{0,2}=572-622$ МПа; $\delta=40-41,4\%$; $KCU_{20}=192-213$ Дж/см²; $KCU_{40}=173-208$ Дж/см². После нагрева в интервале температур 300-600⁰С в результате распада аустенита с выделением карбидов по границам зерен происходит незначительное упрочнение стали AISI 304 до $\sigma_b=800-810$ МПа; $\sigma_{0,2}=630-640$ МПа, при этом относительное удлинение снижается до 31-32% (рис.13).

Нагрев в интервале температур 300-600⁰С не приводит к существенному изменению микроструктуры, которая сохраняет следы деформации и имеет строчечный вид (рис.14,а). Нагрев стали выше 700⁰С приводит к плавному снижению прочностных характеристик и росту относительного удлинения. Весьма эффективное снижение прочности и повышение пластичности наблюдается после нагрева стали до 900⁰С, после такой обработки механические свойства стали достигают следующих значений $\sigma_b=670$ МПа; $\sigma_{0,2}=350$ МПа; $\delta=50\%$; $KCU_{20}\geq 190$ Дж/см²; $KCU_{40}\geq 190$ Дж/см². При этом в структуре стали происходят процессы рекристаллизации и растворения дисперсных включений карбидов (рис.14,б,в). Дальнейшее повышение температуры нагрева до 1000-1050⁰С с последующим охлаждением на воздухе сопровождается снижением предела прочности до $\sigma_b=650$ МПа, а предела текучести до 270 МПа при

относительном удлинении 55% и $KCU \geq 190$ Дж/см². Нагрев стали выше 1000^oC приводит к формированию гомогенной аустенитной структуры (рис.14,г).

С целью изучения влияния режимов охлаждения на структуру и свойства стали AISI 304 штампованные образцы нагревали в интервале температур 800-1050^oC и охлаждали в воде, на воздухе и с печью. В результате было установлено, что режим охлаждения (вода, воздух или с печью) мало влияет на процессы разупрочнения стали AISI 304, при этом ее механические свойства практически не зависят от способа охлаждения (табл.5).

Так как для термообработки данной стали необходимы высокотемпературные печи, а иногда и вакуумные либо печи с защитной атмосферой, то актуальным является вопрос применения скоростных методов нагрева для данных материалов. Однако их применение для целого ряда материалов ограничено. Это связано, прежде всего, с недостатком данных о фазовых, структурных превращениях и об изменении свойств материалов в зависимости от скорости, температуры нагрева и условий охлаждения. В связи с этим были проведены исследования влияния скоростного нагрева на структуру и свойства стали AISI 304 после холодной деформации.

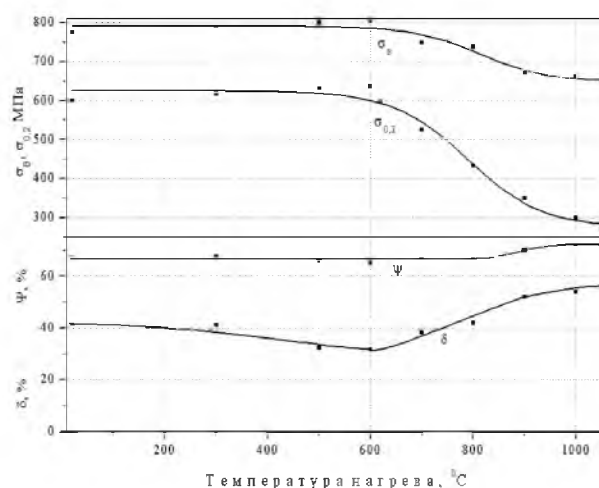


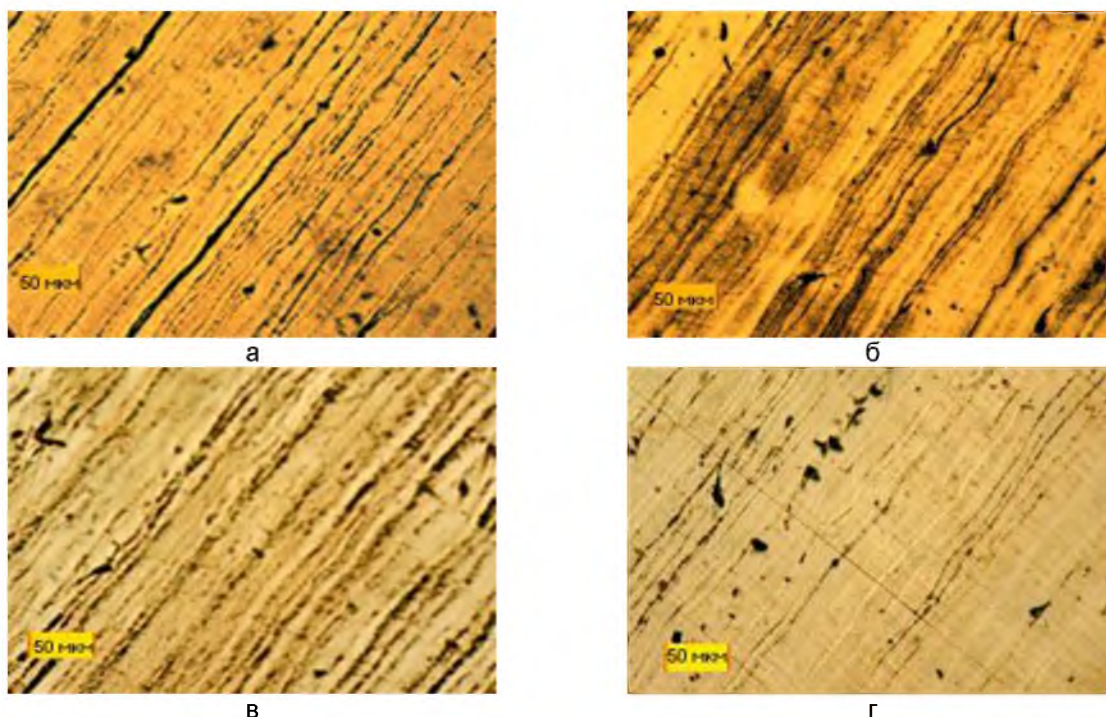
Рисунок 13 – Механические свойства штампованной стали AISI 304 после печного нагрева

Таблица 5 – Механические свойства штампованных образцов стали AISI 304 после различных вариантов охлаждения

Температура нагрева, ^o C	Охлаждение	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
800	печь	695	460	44	67
900	печь	663	300	53,5	72
1050	печь	637	270	56	74
900	вода	660	330	54,1	70,4
1000	вода	675	317	53	70
1050	вода	668	275	54	70
900	воздух	670	350	52	70
1000	воздух	663	300	54	72
1050	воздух	650	271	55	72,5

Образцы стали нагревали в интервале температур 800-1150^oC со скоростью 50^oC/с и охлаждали на воздухе. Результаты испытаний механических свойств отожженных образцов показаны на рис.15. Полученные результаты показали, что в условиях скоростного нагрева разупрочнение деформированной стали AISI 304 протекает аналогично как и в случае печного нагрева, однако при этом происходит смещение температурного интервала на 50-100^oC вверх по температурной шкале. Так снижение прочностных характеристик стали начинается только при нагреве до температур выше 800^oC, а оптимальными температурами отжига являются 900-1000^oC.

Таким образом анализируя полученные данные было установлено, что оптимальная термообработка стали AISI 304, после холодной деформации: печной нагрев до температуры 900-1000°C. Кроме того с целью экономии энергоресурсов перспективным является применение скоростных методов нагрева до температур 900-1000°C со скоростью 50-100°C/с.



нагрев (а – 500°C, б – 800°C, в – 900°C, г– 1050°C) охлаждение на воздухе.
Рисунок 14 – Микроструктура штампованной стали AISI 304 после печного нагрева

Трубы и различные элементы конструкций в зависимости от назначения и размеров допускается изготавливать сварными из нескольких частей с применением всех видов промышленной сварки (автоматической, электрошлаковой, аргонно-дуговой и.т.п.). На механические и технологические характеристики сварных соединений сильное влияние оказывают процессы фазовых и структурных превращений в применяемых сталях. Так при сварке в результате градиентного распределения температурных полей по сечению в сварных соединениях возникают деформации, приводящие к образованию остаточных напряжений.

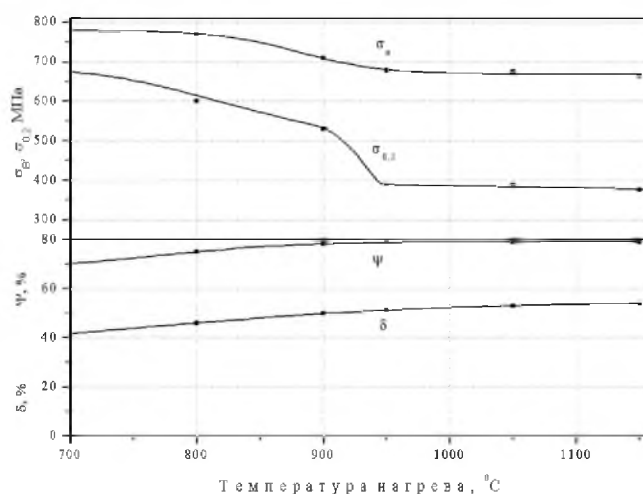


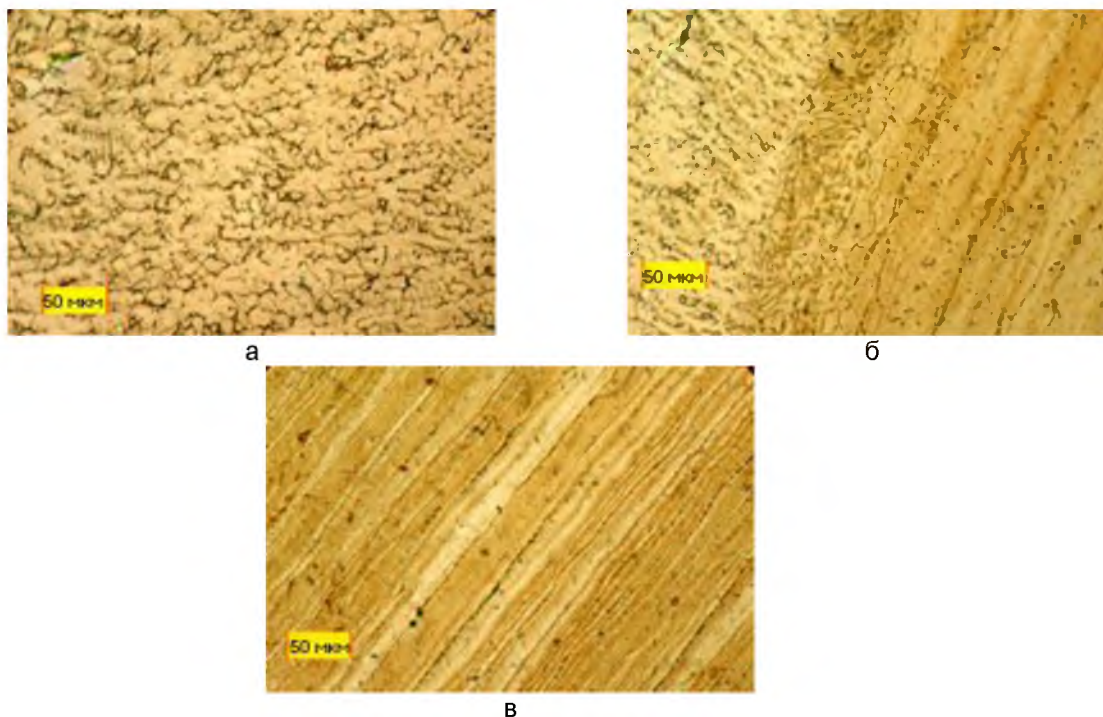
Рисунок 15 – Механические свойства штампованной стали AISI 304 после скоростного нагрева ($V_n=50^\circ\text{C}/\text{с}$)

Пребывание металла в напряженно-деформированном состоянии увеличивает риск хрупкого разрушения сварных конструкций, поэтому немаловажной проблемой остается разработка технологий отжига сварных швов. Поэтому с целью изучения фазовых, структурных превращений и изменения свойств стали AISI 304 в процессе сварки были проведены исследования по определению оптимальных режимов термической обработки сварных заготовок. Образцы для исследований вырезали в месте сварного шва в направлении поперек прокатки.

Механические свойства образцов со сварными соединениями в исходном состоянии находились на уровне нижних значений соответствующих свойств основного металла по стандарту для данной марки стали: $\sigma_b=763$ МПа; $\sigma_{0,2}=622$ МПа; $\delta=20,3\%$; $KCU_{20}=85$ Дж/см²; $KCU_{-40}=76$ Дж/см² (табл.6).

Таблица 6 – Механические свойства образцов стали AISI 304 со сварным швом

Температура нагрева, °С	Охлаждение	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU_{+20} , Дж/см ²	KCU_{-40} , Дж/см ²
исходный		763	622	20,3	16	85	76
800	печь	652	440	27	52		
900	печь	628	380	41,2	58		
900	воздух	652	368	37	59		
1050	воздух	621	333	45	61		
900	вода	630	352	37,3	60		
1050	вода	615	320	44,8	61		



а – сварной шов, б – переходная зона сварного шва, в – основной металл.

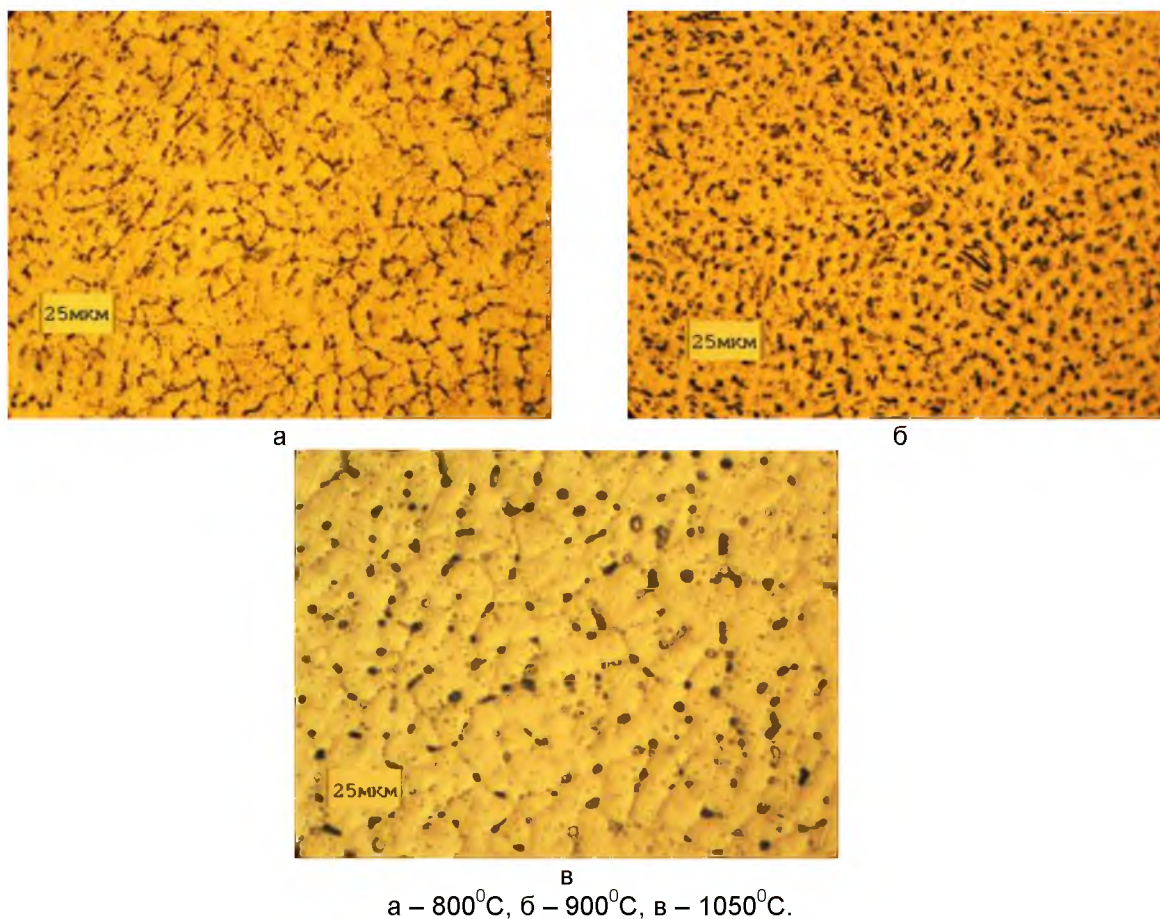
Рисунок 16 – Микроструктура сварного шва стали AISI 304

Микроструктура сварного шва (рис.16,а) представляла собой аустенит с четко выраженной дендритной структурой. Переходная зона также имела аустенитную структуру (рис.16,б), а основной металл представлял собой строчечную аустенитную структуру с включениями феррита и карбидов (рис.16,в). Изучение макроструктуры сварного шва показало, что он не имеет дефектов в виде раковин, не проваров и т.д.

Нагрев образцов со сварным швом до температуры 800 и охлаждение с печи показало, что механические свойства стали достигают значений: $\sigma_b=652$ МПа; $\sigma_{0,2}=440$ МПа; $\delta=27\%$ (табл.6). Повышение температуры нагрева до 900°С приводит к

дальнейшему снижению прочностных свойств до $\sigma_b=650-630$ МПа; $\sigma_{0,2}=380-350$ МПа, а относительное удлинение возрастает до 37% при охлаждении на воздухе или в воде и до 41% при охлаждении с печью. В процессе нагрева в интервале температур 800-900 $^{\circ}$ С в структуре сварного шва происходит распад аустенита с выделением карбидной фазы по границам зерен (рис.17,а,б). Дальнейшее повышение температуры до 1050 $^{\circ}$ С позволяет получить наиболее благоприятные механические свойства образцов со сварными швами ($\sigma_b=615-620$ МПа; $\sigma_{0,2}=320-330$ МПа; $\delta=44-45\%$), причем режим охлаждения (вода или воздух) не оказывает влияния на механические свойства стали. В структуре сварного шва формируется зеренная аустенитная структура с выделениями карбидов (рис.17,в)

В дальнейшем были проведены исследования по возможности применения скоростных методов нагрева для отжига сварных швов стали AISI 304. Для этого образцы со сварным швом нагревали в интервале температур 800-1050 $^{\circ}$ С со скоростью 50 $^{\circ}$ С/с и охлаждали на воздухе. Испытания образцов на механические свойства показали (рис.18), что эффективное разупрочнение сварных соединений и достижение необходимого уровня свойств возможно лишь при нагреве выше температуры 1000 $^{\circ}$ С.



а – 800 $^{\circ}$ С, б – 900 $^{\circ}$ С, в – 1050 $^{\circ}$ С.
Рисунок 17 – Микроструктура сварного шва стали AISI 304 после отжига

Таким образом, отжиг изделий из стали AISI 304 имеющих сварные швы рекомендуется отжигать в печи по следующему режиму: нагрев до температуры 1000-1050 $^{\circ}$ С и охлаждение с печью или на воздухе. Кроме того, весьма перспективным методом отжига может быть местный нагрев сварного соединения и околошовной зоны с применением индукционного или ТВЧ нагрева до температур 1000-1050 $^{\circ}$ С с последующим охлаждением на воздухе. При этом металл в зоне сварного соединения приобретает необходимые свойства.

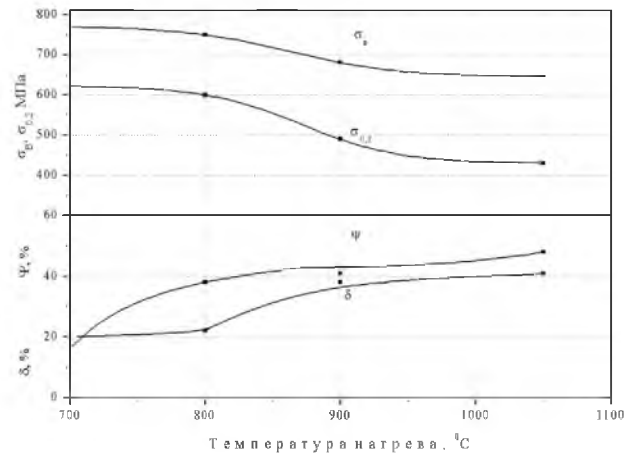


Рисунок 18 – Механические свойства сварных швов стали AISI 304 после скоростного отжига ($V_n=50^\circ\text{C}/\text{c}$)

Возможные варианты реализации разработанных технологий в промышленности

В настоящее время многие трубопрокатные заводы ведут маркетинговые и инженерные проработки по возможности модернизации своих термических производств, с целью их автоматизации и внедрения энергосберегающих технологий термообработки трубного проката. Для достижения этой цели основной уклон направлен на моделирование и разработку современных автоматизированных комплексов оборудования для термической обработки горячедеформированных труб индукционным способом. Данные комплексы должны обеспечивать обработку бесшовных горячедеформированных труб из углеродистых и легированных марок сталей (37Г2С, 36Г2С, 45ГБМ, 45ГБ, 45, 30ХМА, 32Г2, 26Г1, 25Г2, 25Г2А, 27ГЮ, 45ГА, 35Г2Ф, 10, 20, 09Г2С, 10Г2А, 20А, 13ХФА, 30Г2, 32Г2, 37Г2Ф, 15Х5М и другие.), производимые на существующих установках трубопрокатных цехов. Дополнительно в качестве передельной трубы для последующей термообработки могут использоваться трубы холодной прокатки.

Комплекс оборудования должен включать в себя:

- загрузочный стол для раскатки трубной заготовки с устройством механизации поштучной подачи труб;
- линию роликов, осуществляющих транспортировку труб при термообработке;
- нагревательный блок индукторов, предназначенных для нагрева трубы под закалку;
- блок индукторов, предназначенных для выравнивания температуры по сечению и длине трубы (индукторы-термостаты),
- охлаждающее устройство водо-воздушный или водяной спрейер (устройства для закалки труб с наружной поверхности, с системой сбора и фильтрации воды);
- механизация, предназначенная для сброса трубы на промежуточный стеллаж;
- промежуточный стеллаж, предназначенный для слива воды, попавшей внутрь трубы при закалке;
- механизация, предназначенная для сброса трубы в линию отпуска;
- нагревательный блок индукторов, предназначенный для нагрева трубы под отпуск;
- блок индукторов, предназначенных для выравнивания температуры по сечению и длине трубы при отпуске (индукторы-термостаты);
- линия роликов, осуществляющих транспортировку труб к правильной машине;
- накопительный стол (стол выгрузки) труб, прошедших термообработку.

Нагревательные блоки должны обеспечивать нагрев под закалку до температуры 1000°C , под отпуск до 780°C с перепадом по сечению не более $\pm 50^\circ\text{C}$. Индукторы термостаты должны обеспечивать поддержание температуры нагрева в течении определенного времени и предназначены: для выравнивания температуры по объему;

для более полного протекания фазовых и структурных процессов в сталях в процессе нагрева под закалку и отпуск. Комплекс оборудования должен обеспечивать скорость движения трубы 0,1-10 м/мин. Питание нагревательных блоков должно осуществляться от современных полупроводниковых преобразователей частоты соответствующей мощности с регулируемыми частотами тока. Охлаждающее устройство должно обеспечивать скорость охлаждения в интервале температур 1000 - 480°С для труб с толщиной стенки 8 мм (по всей толщине стенки) не менее 50°С/сек. Скорость охлаждения должна обеспечивать выполнение требований API 5CT по прокаливанию не менее 90% мартенсита для стали 30Г2. Причем для легированных сталей 30Г, 30Г2, 18ХМФБ, 30ХМА и их аналогов после закалки и отпуска труб не должны образовываться закалочные трещины. Разброс твердости по толщине стенки трубы и между отдельными квадрантами не должен превышать 3HRC. Нагрев должен исключать обезуглероживание и перегрев, ведущий к росту начального аустенитного зерна. Комплекс должен иметь систему автоматизированного контроля и управления работой оборудования, включая механизацию и технологические режимы (автоматизированная задача труб в линию, перемещение по ней и сброс на стол выгрузки, включая правильную машину; автоматизированная регулировка мощности индукторов и скорости перемещения трубы через индуктора в зависимости от заданной температуры в контрольных точках, либо регулировка температуры в заданном интервале и мощности в зависимости от заданной скорости перемещения трубы).

По данным требованиям была спроектирована модель описанного выше комплекса, общие виды которого показаны на рисунках 19-20.

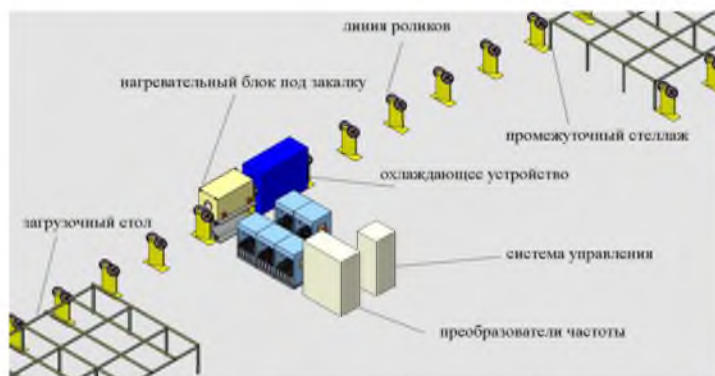


Рисунок 19 – Модель участка для закалки горячекатаных труб

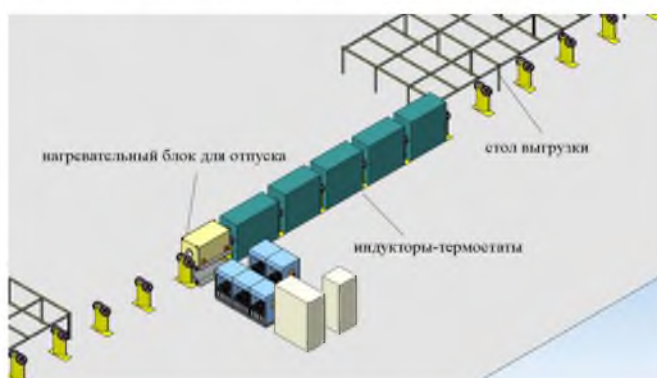


Рисунок 20 – Модель участка для отпуска горячекатаных труб

Особенностью технологической подготовки производства деталей, подвергаемых термообработке, является необходимость анализа обоснованности назначения режимов их обработки уже на стадии проектирования. Традиционно этот анализ осуществляется экспериментальными методами, с применением разрушающих методов контроля и металлографии, что связано с большими затратами времени и материальных средств. Одним из эффективных направлений решения указанных проблем является применение методов компьютерного моделирования, которые при минимальном количестве дорогостоящих экспериментальных исследований позволяют

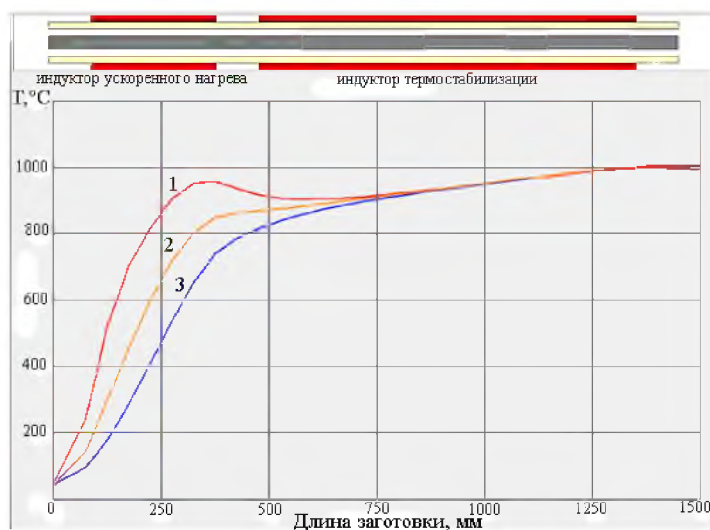
получить максимальное количество информации о характеристиках разрабатываемого процесса и свойствах полученных изделий. Мировая тенденция развития данного направления заключается в применении CALS-технологии, то есть сквозной автоматизации всего жизненного цикла изделия. Методы компьютерного моделирования широко используются и при проектировании оборудования для термообработки труб [7-10].

Методы математического моделирования позволяют рассматривать различные стадии производства и эксплуатации изделий в режиме «реального» времени. Поскольку фактически любой процесс, происходящий в окружающем мире, можно описать при помощи математических моделей с той или иной точностью, то используя современные высокопроизводительные ЭВМ можно осуществлять прогнозирование поведения изделия, как в процессе его изготовления, так и при эксплуатации. Адекватность моделей зависит лишь от точности, с которой проводится исследование. Для обеспечения более высокой точности используется большее количество уравнений и итераций, соответственно требуется большее время для моделирования.

Однако математическое моделирование процессов термообработки невозможно без детального изучения и анализа: кинетики фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах; теплофизических и электромагнитных процессов происходящих при нагреве; процессов формирования физико-механических и технологических свойств деталей.

С целью определения оптимальных режимов нагрева труб под термообработку и выбора электрических параметров преобразователей частоты были проведены работы по расчету температурных полей формирующихся в заготовке диаметром 245 мм и толщиной стенки 8, 10, 12 мм при непрерывно последовательном нагреве в блоке из двух индукторов и последующей закалке в спрейерной установке. Заданная производительность комплекса – 7 тон в час.

Компьютерное моделирование процесса индукционного нагрева трубы проводилось с помощью лицензионной программы *Universal 2 D*. По результатам расчета был произведен выбор из линейки тиристорных преобразователей частоты. Для индуктора ускоренного нагрева выбран – ТПЧ-1600/2,4, а для индуктора выравнивания и термостабилизации – ТПЧ-630/2.4. Далее для эксперимента были спроектированы несколько типов индукционных нагревателей различной конструкции. После этого решалась задача сравнить характеристики работы этих индукторов с целью выбора оптимального распределения температурного поля вдоль нагреваемой зоны трубы (рис.21,22), так как от равномерности нагрева в дальнейшем зависит качество закалки и уровень механических свойств.



Температура 1 – на поверхности, 2 – в середине, 3 – на внутренней поверхности трубы 245x12.

Рисунок 21 – График распределения температуры вдоль заготовки

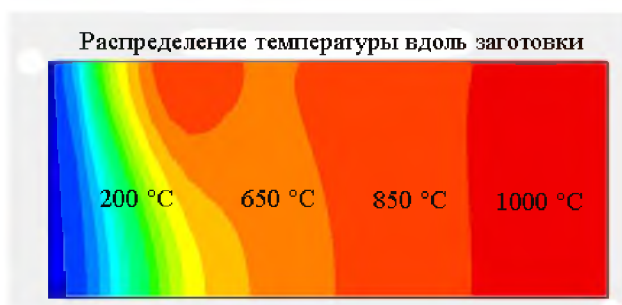


Рисунок 22 – Распределение температурного поля вдоль заготовки

Анализ температурных полей и распределения температуры по сечению трубы показало, что при реализации схемы использования двух различных индукторов удастся избежать перегрева поверхности трубы сверх заданной температуры, а на выходе из блока индукторов получить перепад температуры по сечению детали не превышающий 30°C.

В процессе моделирования установлено, что наибольшая мощность и затраты энергии на нагрев потребляются в начальный момент времени когда заготовка холодная и греется до температуры точки Кюри, а далее по мере прогрева заготовки и утери парамагнитных свойств мощность снижается и происходит догрев в основном за счет теплопроводности (рис.23). Поэтому использование технологии ускоренного нагрева с последующей стабилизацией является более энергоэффективной по сравнению с технологией нагрева с постоянной мощностью. Реализация технологии ускоренного нагрева может осуществляться путем использования индукторов с переменным шагом намотки при их запитывании от преобразователей малой мощности и комбинацией последовательного и параллельного соединения секций индукторов при их запитывании от преобразователей средней и большой мощности.

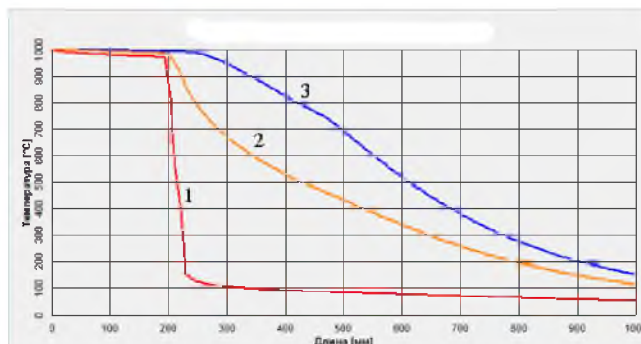


Рисунок 23 – Распределение удельной мощности вдоль загрузки

Однако наиболее перспективным способом реализации такой технологии является использование различных преобразователей частоты для питания отдельных секций индукторов. Преобразователь большой мощности в данном случае используется для питания индуктора ускоренного нагрева и преобразователя меньшей мощности для питания индуктора термостабилизации. Применение этого способа позволяет повысить точность регулирования и уменьшить колебания температуры в переходных процессах.

Далее произведен расчет процесса охлаждения с закалочной температуры с использованием водо-воздушного или водяного спрейерного охлаждения при скорости движения трубы 50 мм/с (рис.24). Анализ графика распределения температуры вдоль загрузки трубы показывает, что скорость охлаждения в диапазоне температур 900-480°C составляет: 1100 °C/c – на наружной поверхности трубы, 90 °C/c – в середине сечения и 72 °C/c – на внутренней поверхности трубы. Данных скоростей охлаждения достаточно для формирования необходимой микроструктуры и свойств трубных сталей. Однако для легированных сталей рекомендуется использование водо-воздушного способа охлаждения позволяющего регулировать процесс отвода тепла

для уменьшения скорости поверхностного охлаждения с целью предотвращения образования закалочных трещин. Аналогичным образом был произведен расчет процесса нагрева и охлаждения для операции отпуска.



Температура 1 – на поверхности, 2 – в середине, 3 – на внутренней поверхности трубы 245x12.
Рисунок 24 – График распределения температуры вдоль заготовки в процессе охлаждения

Заключение

В результате проведенных исследований разработана перспективная энергоэффективная технология индукционной термообработки труб, изготовленных из углеродистых и легированных сталей, обеспечивающая необходимый уровень механических свойств в соответствии с требованиями отечественных и международных стандартов. Показано, что применение скоростного нагрева для термообработки, позволяет получить более высокие свойства по сравнению с аналогичной печной термической обработкой, при сокращении времени нагрева, исключении окисления, угара и обезуглероживания металла. Для реализации данной технологии был разработан современный автоматизированный комплекс, который может быть использован в трубопрокатном производстве для замены газового печного нагрева.

Список литературы:

1. Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. Технология и оборудование трубного производства. М: «Интермет Инжиниринг», 2001.- 608 с.
2. Создание производства спиральношовных электросварных труб диаметром до 1420 мм для магистральных трубопроводов // Металлург, № 12, 2006, С 62-64.
3. Тухбатуллин Ф.Г., Галлиулин З.Т. и др. Низколегированные стали для магистральных газопроводов и их сопротивление разрушению М., 2001, ООО «ИРЦ Газпром», 54 с.
4. Сорокин А.Н., Голованенко С.А., Матросов Ю.И. Влияние микродобавок ниобия на механические свойства низкоуглеродистых сталей различных систем легирования. Сб. «Металловедение качественных сталей и сплавов».- М., «Металлургия», 1982.
5. Baake E., Ubbenjans B., DeKeulenaer H., VanReusel K. The Scope for Electricity & Carbon Saving in the EU through the use of EPM Technologies // Proceedings of International Congress - UIE-2012. Sankt-Petersburg. pp. 215-222.
6. Антикайн П. А. Краткий справочник по металлам для оборудования и трубопроводов ТЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1991.—168 с.
7. Кундас С. П., Тонконогов Б. А., Кашко Т. А., Гринчик Н. Н. Компьютерное моделирование технологических систем. Учеб.пособ. В 2-х ч. Ч. 2. Мн.: БГУИР, 2003. 182 с
8. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численные методы в теории индукционного нагрева. Спб.: Технолит, 2008.
9. Демидович В.Б. Индукционный нагрев толстостенных труб перед объемной закалкой / В. Б. Демидович, Ф. В. Чмиленко, П. А. Ситько, В. В. Андрушкевич.// Индукционный нагрев. - 2015. - Вып. №2 (29), С. 33-36.
10. Демидович В.Б. Периодический способ индукционной термообработки труб большого диаметра / В.Б. Демидович, В.В. Андрушкевич, А.М. Гусев.// Индукционный нагрев. - 2013. - Вып. №1 (23), С. 14-18.