



УДК 621.77:669.14.018.27

Д.П. Канаев, В.М. Тагирова,  
А.А. Соколов, М.В. Зайцева  
ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный  
завод «ММК-МЕТИЗ»  
г. Магнитогорск, Россия  
А.И. Зайцев, А.В. Колдаев,  
А.Б. Степанов, Н.А. Арутюнян  
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им.И.П. Бардина»  
г. Москва, Россия  
E-mail: aizaitsev1@yandex.ru  
Дата поступления 09.06.2022

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ СТАЛИ МАРКИ 42CrMo4 В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

### Аннотация

На промышленных образцах круглого проката диаметрами 18,0 мм и 21,0 мм из стали 42CrMo4 выполнено исследование закономерностей формирования и эволюции структурного состояния и свойств металла при реализации комплексной технологии производства сортового проката и изготовления из него высокопрочных крепежных изделий методами холодной объемной штамповки (ХОШ). При проведении исследования использовали методы световой, сканирующей электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального анализа, испытания механических свойств, измерения твердости, определения общего содержания кислорода, азота, термодинамического, кинетического моделирования и расчета. На стадии производства сортового проката изучены характеристики металлургического качества стали, в том числе обезуглероженного слоя, неметаллических включений (выделений), однородности состава по объему металла. Для этапа подготовки металла для ХОШ установлены зависимости степени сфероидизации ферритно-перлитной структуры и механических свойств от режима сфероидизирующего отжига проката. Наконец для стадии получения крепежных изделий установлены закономерности получения механических свойств в зависимости от параметров закалки и отпуска стали.

**Ключевые слова:** сталь 42CrMo4, круглый прокат, сфероидизирующий отжиг, микроструктура, глобулярный перлит, механические свойства, металлургическое качество, закалка и отпуск, высокопрочные крепежные изделия.

### Введение

Быстрое развитие автомобилестроения, машиностроения, строительной индустрии других отраслей техники и промышленности, стремление к снижению массы, повышению эффективности и надёжности эксплуатации устройств, конструкций обуславливает постоянный рост потребности в высокопрочных крепежных изделиях, изготавливаемых из круглого проката из специальных легированных сталей высокопроизводительными методами высадки и/или холодной объемной штамповки [1]. Используемый для этого сортовой прокат должен

обладать заданным уровнем механических свойств и высокими качественными характеристиками для обеспечения способности к холодной осадке до 1/3 исходной высоты цилиндрического образца без образования трещин и других дефектов [2, 3]. С целью достижения необходимых показателей механических свойств готовых крепежных изделий их подвергают специальной термообработке, включающей закалку и отпуск [4].

Для производства высокопрочного крепежа в мировой практике обычно ис-

пользуют среднеуглеродистые специальные легированные стали, содержащие марганец, хром, молибден, бор и т.п., повышающие прочность и прокаливаемость металла, например, 42CrMo4, 10B21, 20MnTiB, 32CrB4, 34Cr4 и др. [4]. Типичная микроструктура сортового проката из таких сталей после горячей прокатки состоит из феррита и пластинчатого перлита. Сталь с пластинчатой морфологией перлита имеет худшую деформируемость и пластичность, чем с глобулярной морфологией цементита [5]. Поэтому, чтобы круглый прокат выдержал значительную пластическую деформацию без образования дефектов в процессе ХОШ, его подвергают предварительному сфероидизирующему отжигу. Однако часто требуется длительное время отжига от 10 до 24 часов, что является энергозатратным [6, 7]. Поскольку в настоящее время наиболее актуальным становится энергосбережение, то эта же задача ставится и при разработке технологий производства сортового проката [8]. Поэтому многие исследования были проведены, чтобы разработать различные методы для ускорения процесса сфероидизации: деформация перлита [7, 9, 10], измельчение исходной микроструктуры после прокатки [11-15], циклическая термическая обработка [16, 17], субкритический отжиг [5, 6] и другие. Тем не менее, выбор оптимального режима предварительной обработки и сфероидизирующего отжига, в основном, производится методом проб и ошибок применительно к конкретным маркам стали и условиям производства. Для стали марки 42CrMo4 такого рода информация отсутствует.

Еще более сложной задачей является определение оптимальных параметров режимов аустенизации, закалки и отпуска стали для получения требуемого комплекса показателей прочности, твердости, пластичности (относительное удлинение), ударной вязкости, стойкости к статическим и динамическим нагрузкам крепежных изделий, особенно, высоких 12.9, 14.9 классов прочности. В том числе, результаты детального исследования стали марки 32CrB4 показали [18], что повышение класса прочно-

сти крепежных изделий приводит к значительному осложнению технологии производства, поскольку требует поддержания все большего числа параметров в узких диапазонах значений. Если при производстве крепежа класса прочности 8.8 со значительным запасом были обеспечены все заданные требования, то уже в случае класса 10.9 имеет место необходимость поддержания температуры отпуска в довольно узком интервале значений. При гарантированном получении прочностных характеристик для всех классов прочности крепежных изделий, включая 12.9, возникает проблема достижения необходимых значений относительного удлинения стали.

В соответствии с отмеченными обстоятельствами стали для изготовления высокопрочных крепежных изделий должны обладать довольно противоречивыми показателями свойств. С одной стороны, они должны обеспечивать получение металла с низкой прочностью – менее 550 – 600 МПа и хорошей деформируемостью перед ХОШ. Напротив, металл полученных крепежных изделий после аустенизации, закалки и отпуска должен иметь высокую прочность – более 1200 – 1400 МПа, твердости, при удовлетворительных значениях целого ряда других показателей. В результате для производства высокопрочных крепежных изделий используются стали, в основном, подобранные эмпирическим путем. Четкие принципы их разработки до настоящего времени отсутствуют.

Для продвижения в направлении формулировки основ создания новых сталей с экономичным составом, оптимальным структурным состоянием для эффективной реализации всей сквозной технологии производства круглого проката и изготовления высокопрочных крепежных изделий настоящая работа посвящена исследованию эволюции структурного состояния и свойств в процессе производства крепежных изделий из стали 42CrMo4. Особое внимание уделено процессам получения сфероидизированной перлитной структуры стали, контролирующей ее технологичность в процессе ХОШ, а также возможности достиже-

ния механических свойств получаемых крепежных изделий, соответствующих различным классам прочности.

## Основная часть

### 1. Материал и методы исследования

Объектом исследования служил круглый прокат промышленного производства диаметром 18 и 22 мм из стали марки 42CrMo4, химический состав которой представлен в таблице 1.

Для обеспечения корректности анализа влияния именно режима сфероидизирующего отжига и микроструктуры на способность к холодной осадке, предварительно исследовали металлургическое качество полученного сортового проката. Исследование микроструктуры и обезуглероженного слоя, неметаллических включений проводили с помощью оптического микроскопа НЕОРНОТ-21 и сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV. Предварительное травление поверхности микрошлифов осуществляли с помощью раствора «Ниталь» (4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте). Соотношение долей перлита и феррита определяли в соответствии с ГОСТ 8233-56, глубины

обезуглероженного слоя по ГОСТ 1763-68, оценку действительного и аустенитного зерна производили по ГОСТ 5639-82, содержания неметаллических включений согласно ГОСТ 1778-70 сравнением с эталонными шкалами методом Ш4. Идентификацию неметаллических включений проводили методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и локального рентгеноспектрального анализа с помощью микроскопа JSM-6610LV (Japan) с приставкой для энергодисперсионного анализа INCA Energy Feature XT. Общее содержание кислорода и азота в круглом прокате определяли методом восстановительного плавления в потоке инертного газа на приборе Лесо ТС-136.

Для исследования влияния режима отжига на интенсивность протекания процесса сфероидизации перлита были выбраны различные температурные и временные параметры его реализации (таблица 2). Температуры  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  для исследуемой стали марки 42CrMo4 находили с помощью термодинамического расчета с использованием собственного программного обеспечения [19]. Их значения составили 744 и 775°C, соответственно.

Таблица 1

Химический состав стали марки 42CrMo4 (масс. %)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V	B	N	Ca
0,41	0,24	0,70	0,002	0,010	1,02	0,04	0,04	0,198	0,026	0,002	0,005	-	0,009	0,0017

Таблица 2

Параметры экспериментальных режимов сфероидизирующего отжига

Режим №	Температура T1, °C	Продолжительность отжига при T1, ч	Продолжительность охлаждения до T2, ч	Температура T2, °C
1	700	4	-	-
2	730	4	-	-
3	760	4	-	-
4	760	-	4	690

Из данных таблицы 2 видно, что температуры сфероидизирующего отжига ниже  $A_{c1}$  на 44 °C (режим №1), ниже  $A_{c1}$  на 14 °C (режим №2) и выше  $A_{c1}$  на 16 °C (режим №3). Кроме того, был исследован ре-

жим с непрерывным медленным охлаждением из двухфазной области (760°C) до температуры ниже  $A_{c1}$  на 54 °C (режим №4). По режимам, представленным в таблице 2, образцы круглого проката диамет-

ром 18 и 22 мм длиной 10 и 120 мм в исходном горячекатаном состоянии отжигали в трубчатой печи электросопротивления, оснащенной терморегулятором, позволяющим задавать и измерять температуру с точностью  $\pm 1-2^{\circ}\text{C}$  по любому выбранному режиму. Эффективность разных режимов сфероидизирующего отжига определяли путем исследования структуры отожженных образцов проката, методом визуального определения соотношения глобулярного и пластинчатого перлита по ГОСТ 8233-56.

Для оценки возможности изготовления из проката из стали марки 42CrMo4 высокопрочных крепёжных изделий разных классов прочности выполнено исследование влияния процессов закалки и отпуска образцов круглого проката при различных температурах на механические свойства. Методика исследования состояла в следующем. Образцы проката диаметром 18 и 22 мм, длиной 120 мм подвергали аустенизации в трубчатой печи при температуре  $850^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа с последующей закалкой в масло. После охлаждения образцов до комнатной температуры осуществляли их отпуск в той же печи при температурах от 400 до  $550^{\circ}\text{C}$ .

С использованием разрывной машины HECKERT FP-100/1 на цилиндрических образцах тип III №7 по ГОСТ 1497-84 определяли механические свойства: временное сопротивление ( $\sigma_{\text{в}}$ ), предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), относительное удлинение ( $\delta$ ), относительное сужение ( $\Psi$ ).

Для оценки прокаливаемости исследуемой стали после закалки измеряли микротвердость с помощью прибора Struers

Duramin-20 на микрошлифах, изготовленных из срединной части закаленных образцов, по диаметру с шагом 0,5 мм.

## 2. Результаты

Как видно из данных таблицы 1 состав полученной стали марки 42CrMo4 характеризуется довольно низким содержанием серы, однако, высокой концентрацией азота.

### 2.1. Механические свойства и микроструктура горячекатаного сортового проката

Результаты определения механических свойств исходного круглого горячекатаного проката представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 видно, что механические свойства двух партий проката диаметром 18 и 22 мм из стали марки 42CrMo4 значительно различаются. По всей видимости, даже сравнительно незначительное различие в диаметрах двух партий проката оказывает значимое влияние на имеющую место скорость охлаждения и структурное состояние стали после горячей прокатки. Об этом свидетельствуют результаты исследований структуры. Образцы металла из проката диаметром 18 мм имели бейнитную структуру, в то время как образцы, изготовленные из проката диаметром 22 мм, имели феррито-перлитную микроструктуру с соотношением перлита и феррита 90/10. Оценка действительного и аустенитного зерна показала, что прокат удовлетворяет требованиям разработанных ТУ. Характерный вид микроструктуры стали исследованных образцов проката диаметром 18 и 22 мм представлен на рисунке 1.

Таблица 3

Механические свойства исходного горячекатаного проката из стали марки 42CrMo4

Образец №	Диаметр, мм	Механические свойства до сфероидизирующего отжига			
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
м1	18	595	970	9	33
м2	22	490	840	13	56

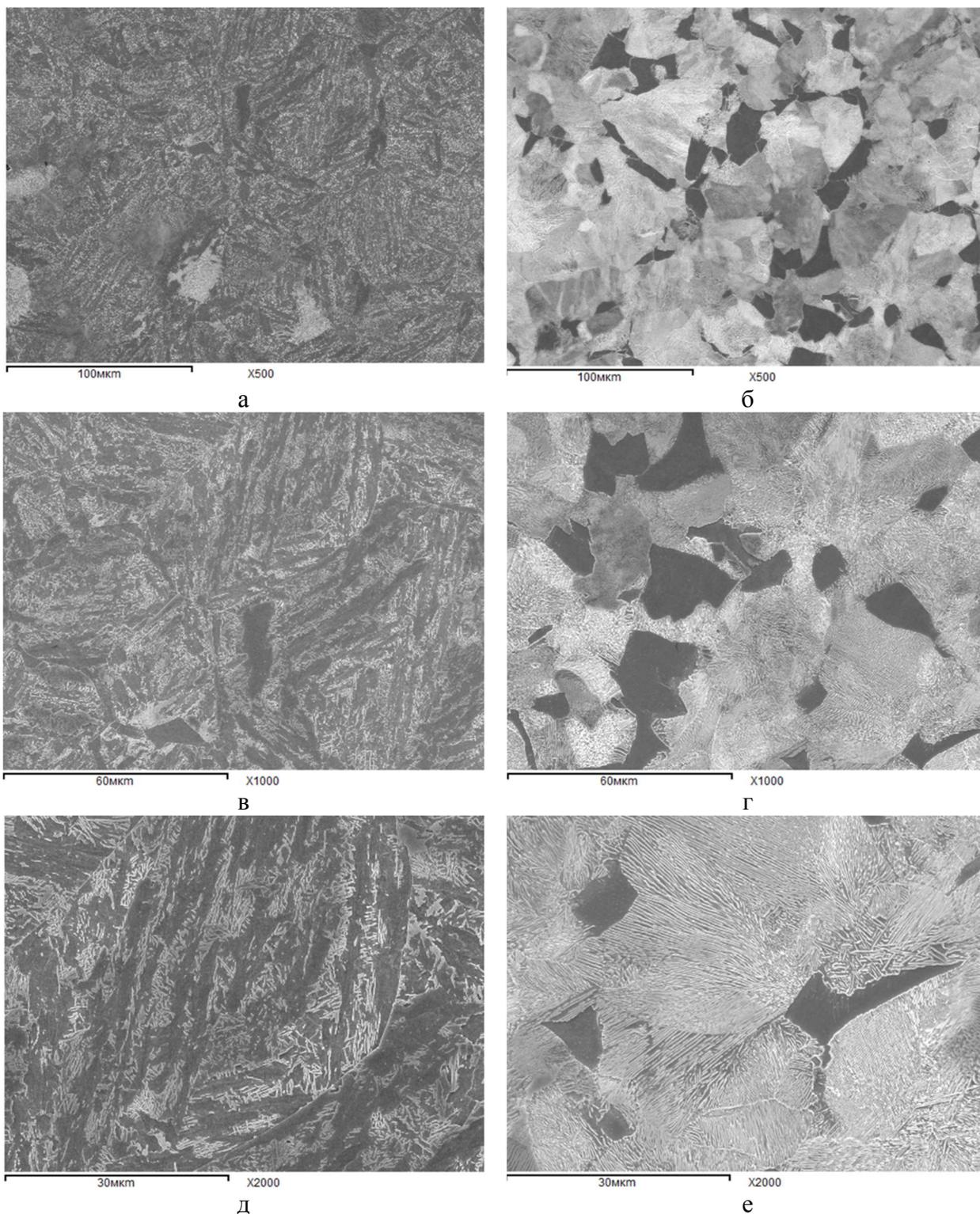


Рисунок 1. Вид микроструктуры образцов проката из стали марки 42CrMo4 (СЭМ) диаметром 18 (а– х500, в –х1000, д– х2000) и 22 мм (б– х500, г –х1000, е– х2000)

## 2.2. Исследование металлургического качества

Результаты исследования глубины обезуглероженного слоя на прокате диаметром 22 мм представлены на рисунке 2.

Из данных рисунка 2 следует, что глубина частично обезуглероженного слоя в

горячекатаном прокате из стали марки 42CrMo4 по всей окружности не превышает 0,6 - 0,7 % от диаметра и полностью удовлетворяет требованиям разработанным ТУ. Важно отметить, что в образцах из стали марки 42CrMo4 частичное обезуглероживание зафиксировано по всей поверхности,

что может указывать на использование неоптимальных технологических параметров нагрева НЛЗ или температурно-скоростного режима горячей прокатки.

Результаты исследования содержания неметаллических включений на продольных образцах, изготовленных из круглого проката диаметром 18 и 22 мм представлены в таблице 4.

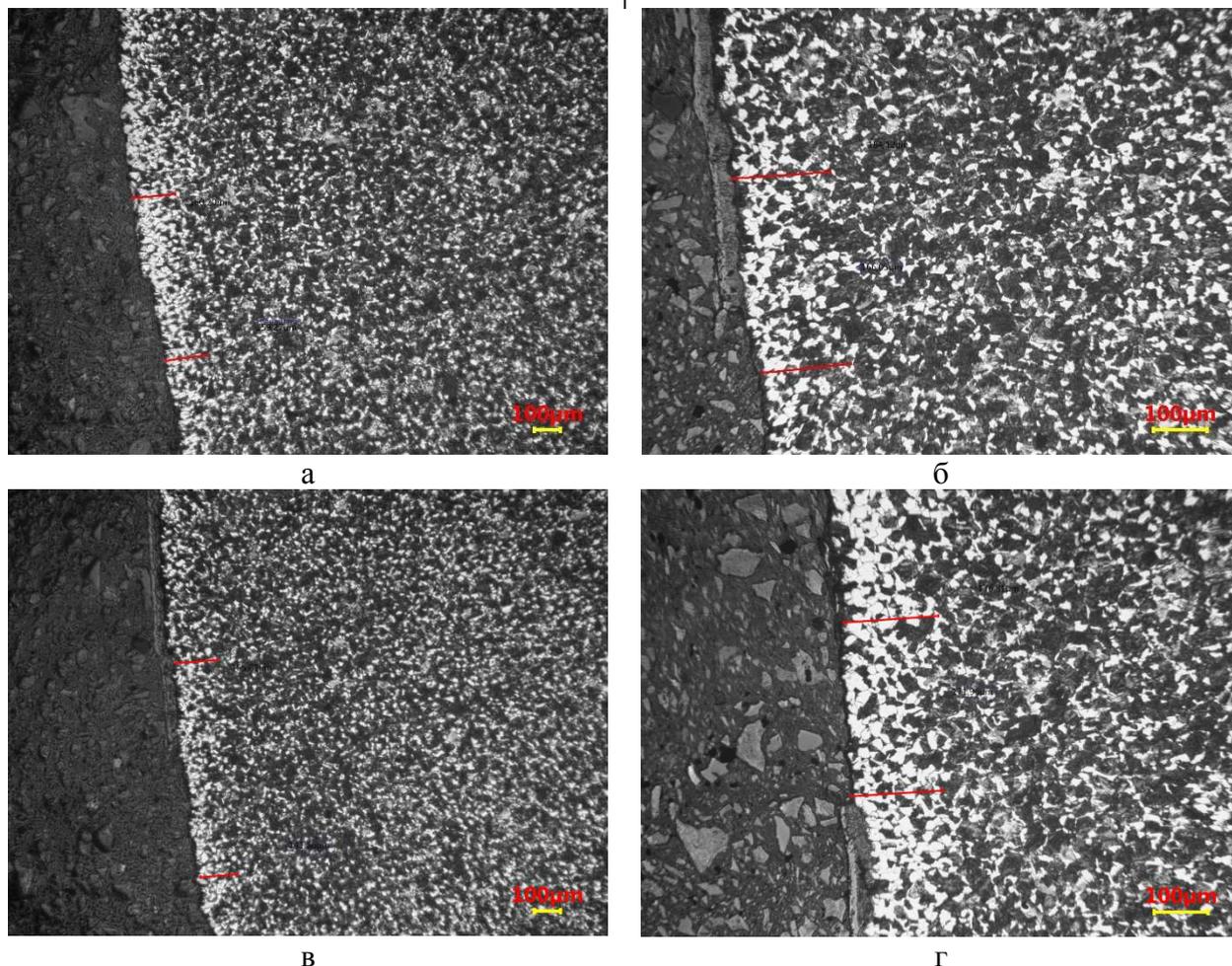


Рисунок 2. Вид участков с частичным обезуглероживанием на образце проката диаметром 22 мм. (а, в – х50, б, г – х100)

Таблица 4

Содержание неметаллических включений в прокате из стали марки 42CrMo4 по ГОСТ 1778 метод Ш4

№ образца	Диаметр, мм	Неметаллические включения по ГОСТ 1778, балл							
		С	ОТ	ОС	СХ	СП	СН	НС	НТ
м3	18	0	2,0	1,0	1,0	-	1,5	0	0
м4	22	0	1,0	2,0	1,0	-	1,0	0	0

С - сульфиды; ОТ - оксиды точечные; ОС - оксиды строчечные; СХ - силикаты хрупкие; СП - силикаты пластичные; СН - силикаты недеформирующиеся; НС - нитриды и карбонитриды строчечные; НТ - нитриды и карбонитриды точечные.

Таблица 5

Общее содержание кислорода и азота в круглом прокате из стали марки 42CrMo4

Зона исследования	Образец №	Диаметр, мм	Общее содержание кислорода, ppm	Общее содержание азота, ppm
Осевая зона	м5	22	20	100
Приповерхностная зона	м5	22	20	110

Из данных таблицы 4 следует, что исследуемый прокат из стали марки 42CrMo4 обладает меньшей концентрацией неметаллических включений по сравнению с результатами исследований, полученных на образцах проката из стали марки 32CrB4, в том числе, металл отличается практически полным отсутствием нитридных и сульфидных выделений. Это обусловлено отсутствием микролегирования стали титаном и низким содержанием серы. С целью определения характеристик присутствующих неметаллических включений произведено детальное исследование методами сканирующей электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального анализа, а также определение общего содержания кислорода и азота в осевой и приповерхностной зонах проката. Полученные результаты представлены в таблице 5 и на рисунке 3.

Из данных, представленных на рисунке 3 и в таблице 5, следует, что основным типом неметаллических включений в исследуемых образцах проката являются оксидные включения на основе алюминатов кальция с присутствием составляющей алюмомагниево-шпинели. Несмотря на относительно невысокие значения общего содержания кислорода (20 ppm), при исследовании были зафиксированы оксидные

включения размером более 10 мкм, в том числе обладающие неправильной формой, что может указывать на неоптимальные параметры, обработки стали кальцийсодержащими материалами и доминирующем присутствием кислорода в составе оксидных включений. Важно отметить, что при исследовании на электронном сканирующем микроскопе не было зафиксировано строчек из оксидных включений и раскатанных включений сульфида марганца. Последнее, по всей видимости, обусловлено низким содержанием серы в стали. Исходя из результатов оценки балла НВ по ГОСТ 1778-70 следует, что имеются возможности производства в условиях ПАО «ММК» проката, удовлетворяющего требованиям разработанных ТУ.

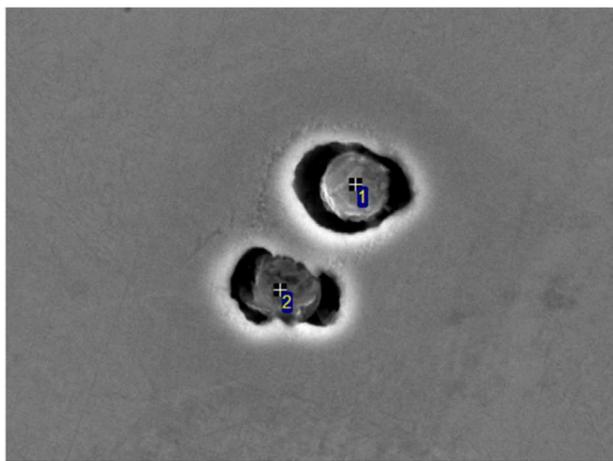
### 2.3. Исследования влияния режима сфероидизирующего отжига на микроструктуру и механические свойства

На рисунках 4-11 и в таблице 6 представлены характеристики и вид микроструктуры исследуемого сортового проката и структуры сфероидизирующего отжига, проведенного по различным режимам (таблица 2).

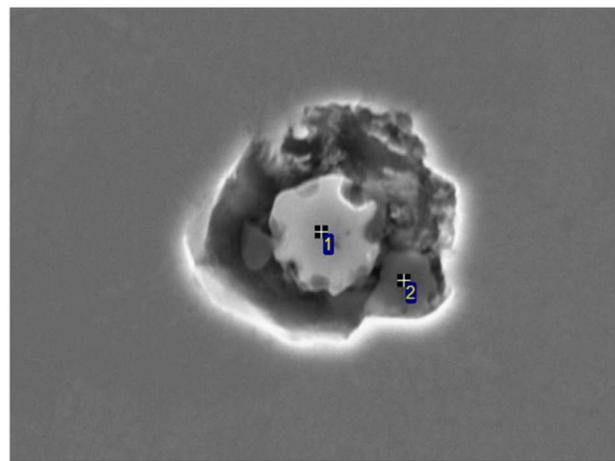
Таблица 6

Характеристики структурного состояния образцов проката, после экспериментальных режимов сфероидизирующего отжига

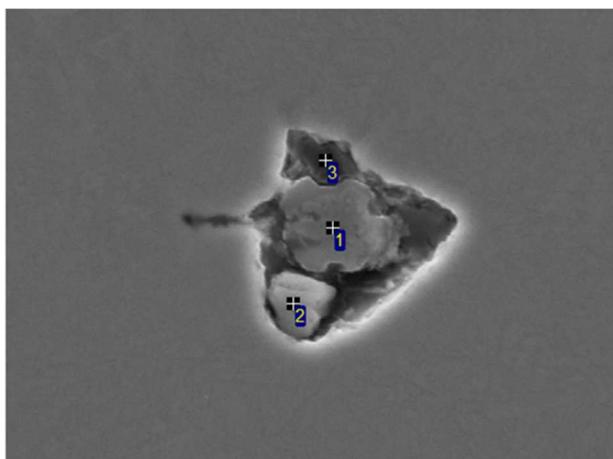
Образец №	Режим №	Диаметр, мм	Соотношение глобулярного и пластинчатого перлита, % после сфероидизирующего отжига	Соотношение перлита и феррита, %
м6	1	18	5/95	90/10
м7	1	22	5/95	65/35
м8	2	18	35/65	85/15
м9	2	22	40/60	95/5
м10	3	18	5/95	85/15
м11	3	22	5/95	85/15
м12	4	18	70/30	90/10
м13	4	22	60/40	95/5



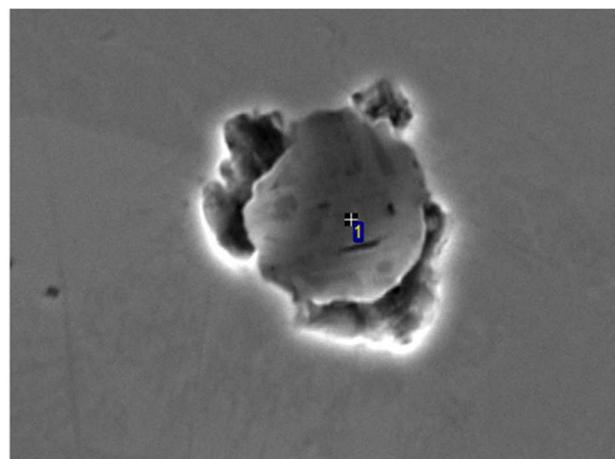
Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
1	28.79	1.70	25.00	1.67	5.15	12.92	24.78
2	25.47	1.60	22.63	0.82	7.37	16.65	25.46



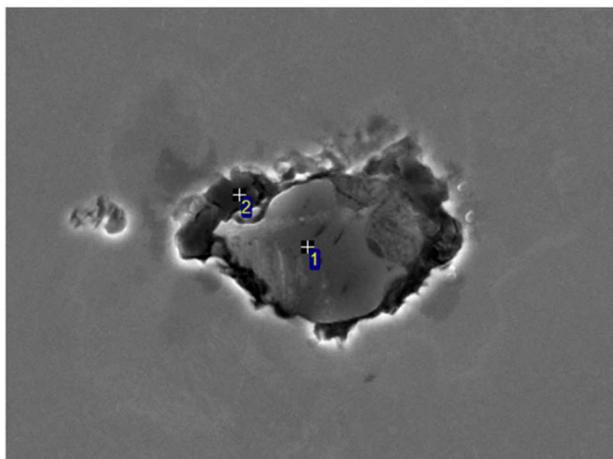
Спектр	O	Mg	Al	S	S	Ca	Cr	Fe
1	43.04	6.41	23.12	1.25	1.57	20.62	0.24	3.75
2	16.25	1.75	1.14	0.44	1.26	2.68	2.11	74.37



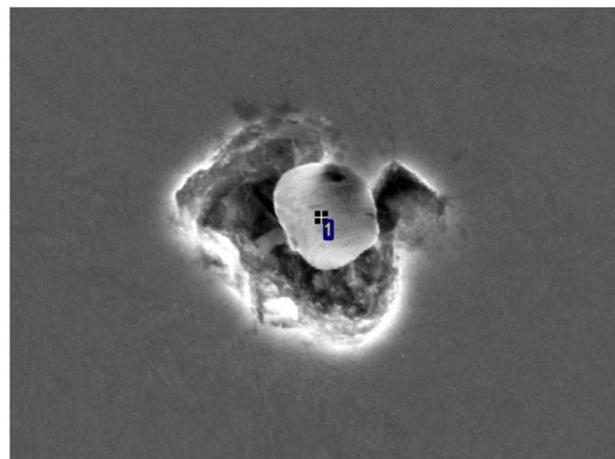
Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Fe
1	47.87	13.32	21.95	0.52	1.03	10.23	0.00	5.08
2	28.29	0.00	0.43	0.14	0.24	0.14	0.34	70.41
3	11.83	1.56	3.30	0.38	3.10	3.13	1.12	75.58



Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe
1	38.06	2.11	21.27	0.85	0.68	28.58	8.45

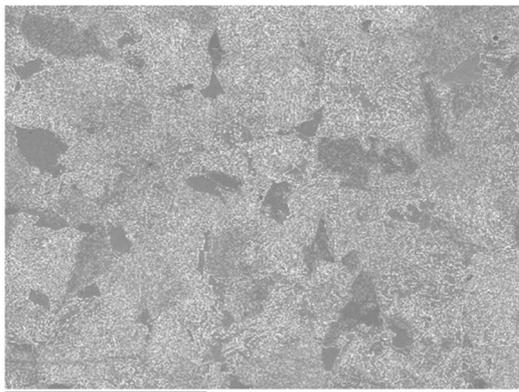


Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Fe
1	41.97	2.75	26.00	0.89	0.36	25.97	0.00	2.06
2	17.64	1.32	3.61	0.28	1.72	4.18	0.78	70.46

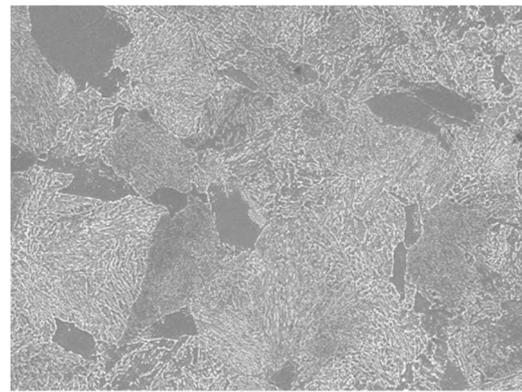


Спектр	O	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe	M
1	34.73	2.76	20.10	0.61	16.09	0.56	23.13	2.01

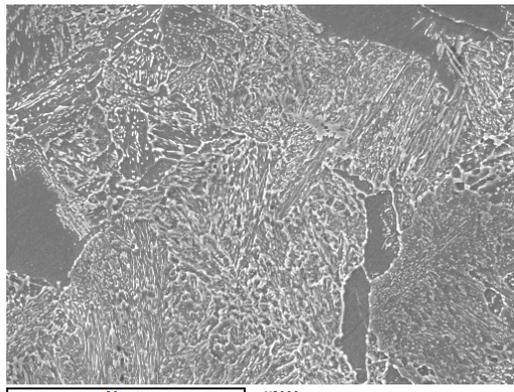
Рисунок 3. Типичный вид и состав неметаллических включений в прокате из стали марки 42CrMo4



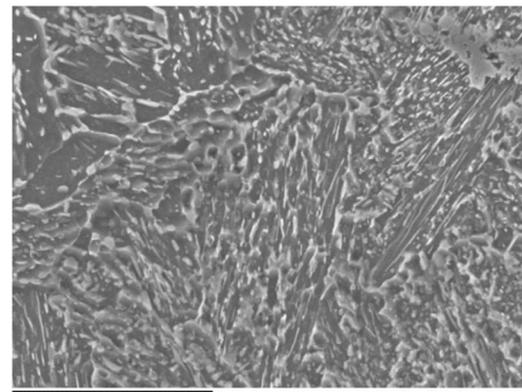
а



б

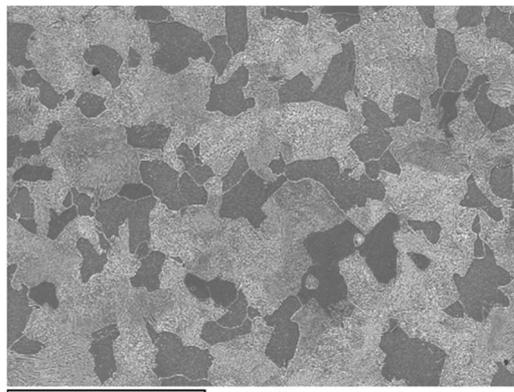


в

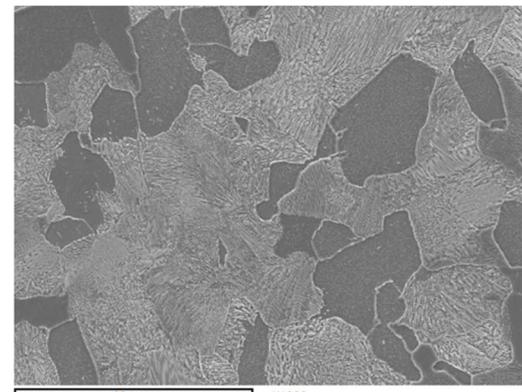


г

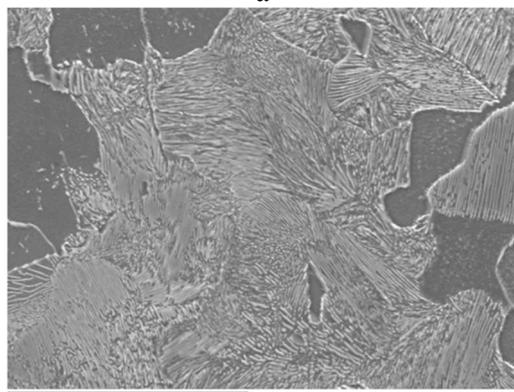
Рисунок 4. Вид микроструктуры образца проката диаметром 18 мм из стали 42CrMo4 (СЭМ) (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №1



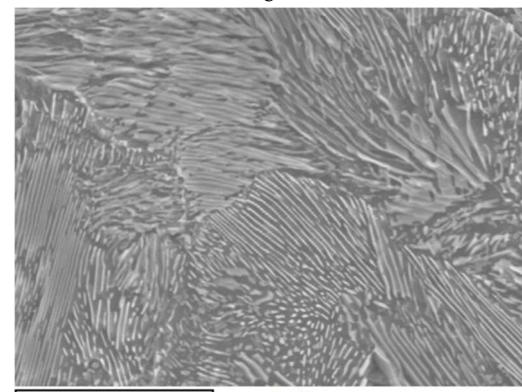
а



б

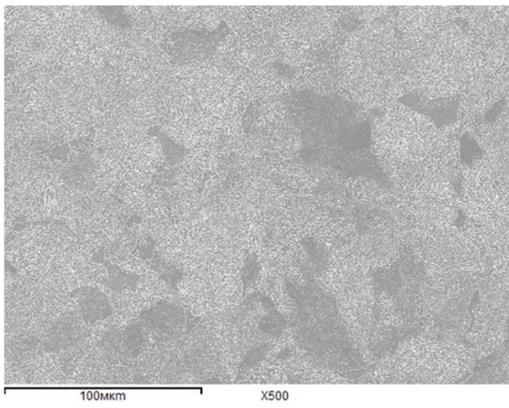


в

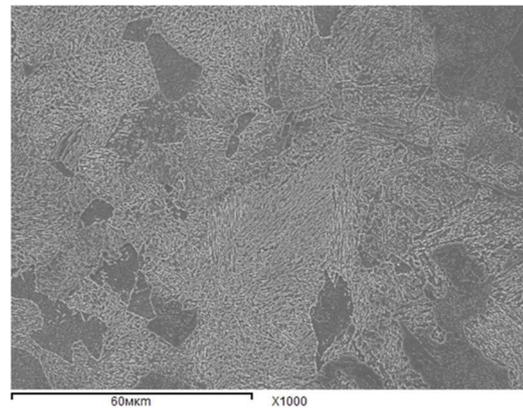


г

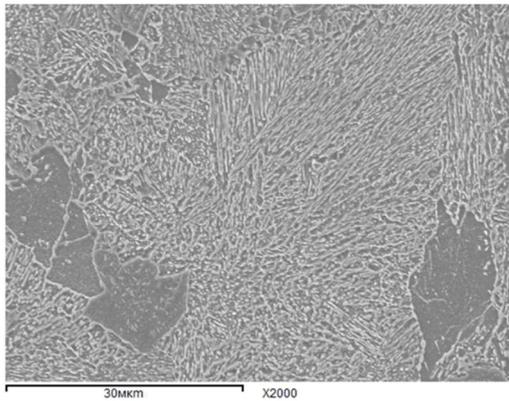
Рисунок 5. Вид микроструктуры образца проката диаметром 22 мм из стали 42CrMo4 (СЭМ) (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №1



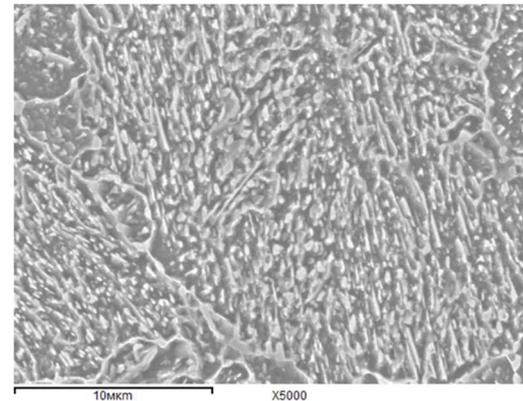
а



б

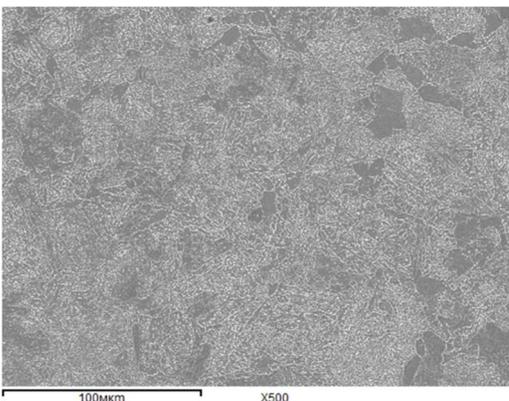


в

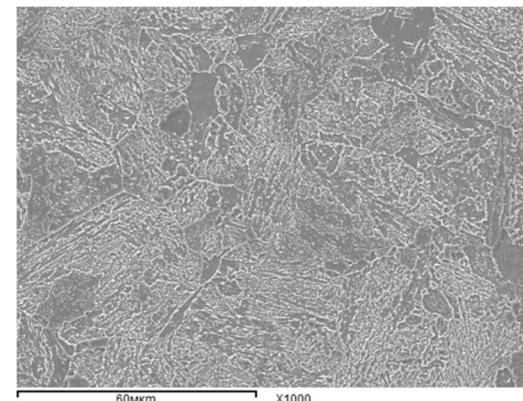


г

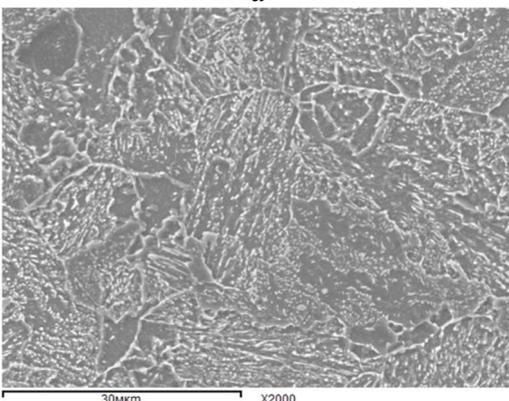
Рисунок 6. Вид микроструктуры образца проката диаметром 18 мм из стали 42CrMo4 (СЭМ) (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №2



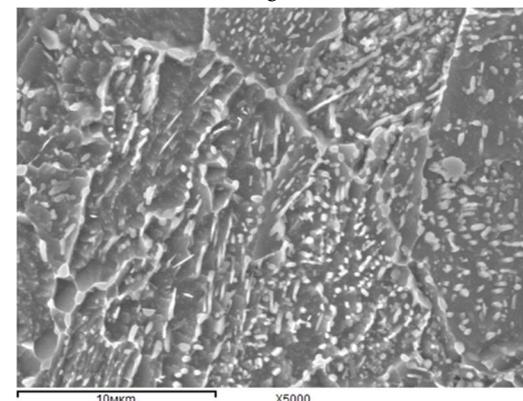
а



б



в



г

Рисунок 7. Вид микроструктуры образца проката диаметром 22 мм из стали 42CrMo4 (СЭМ) (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №2

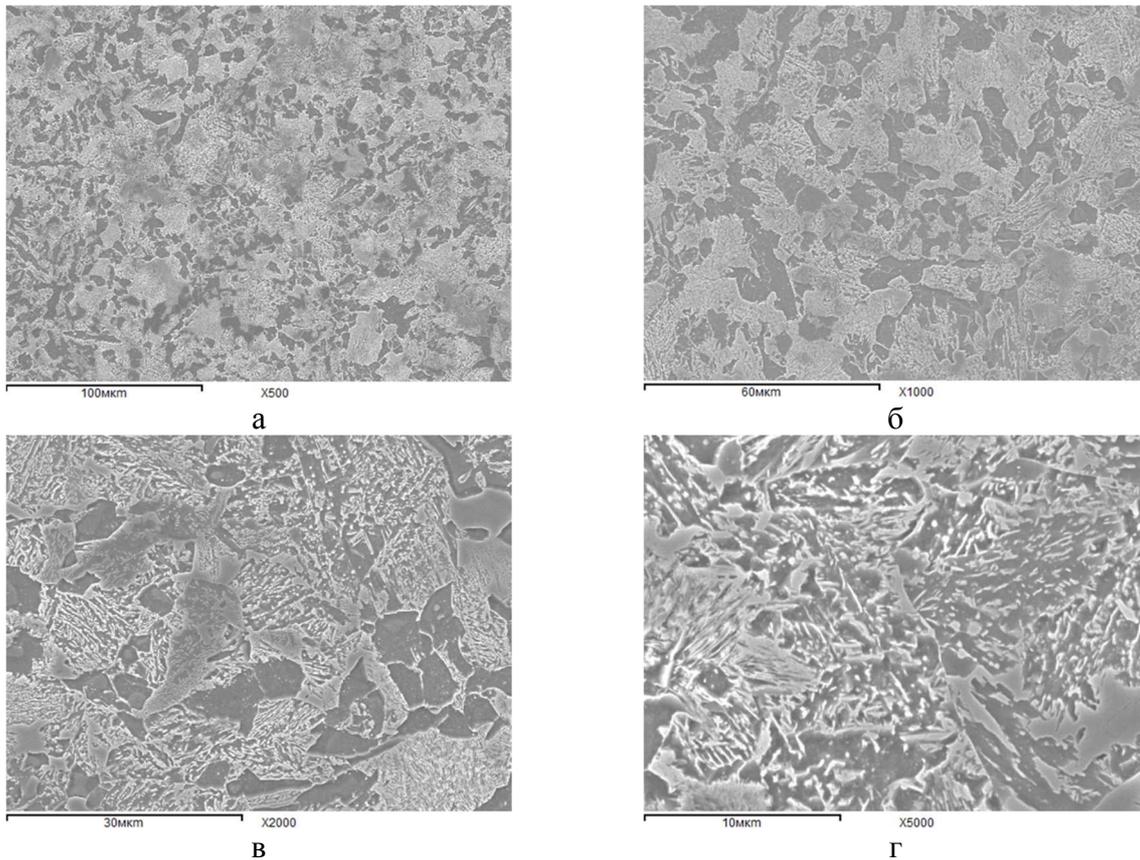


Рисунок 8. Вид микроструктуры образца проката диаметром 18 мм из стали 42CrMo4 (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №3

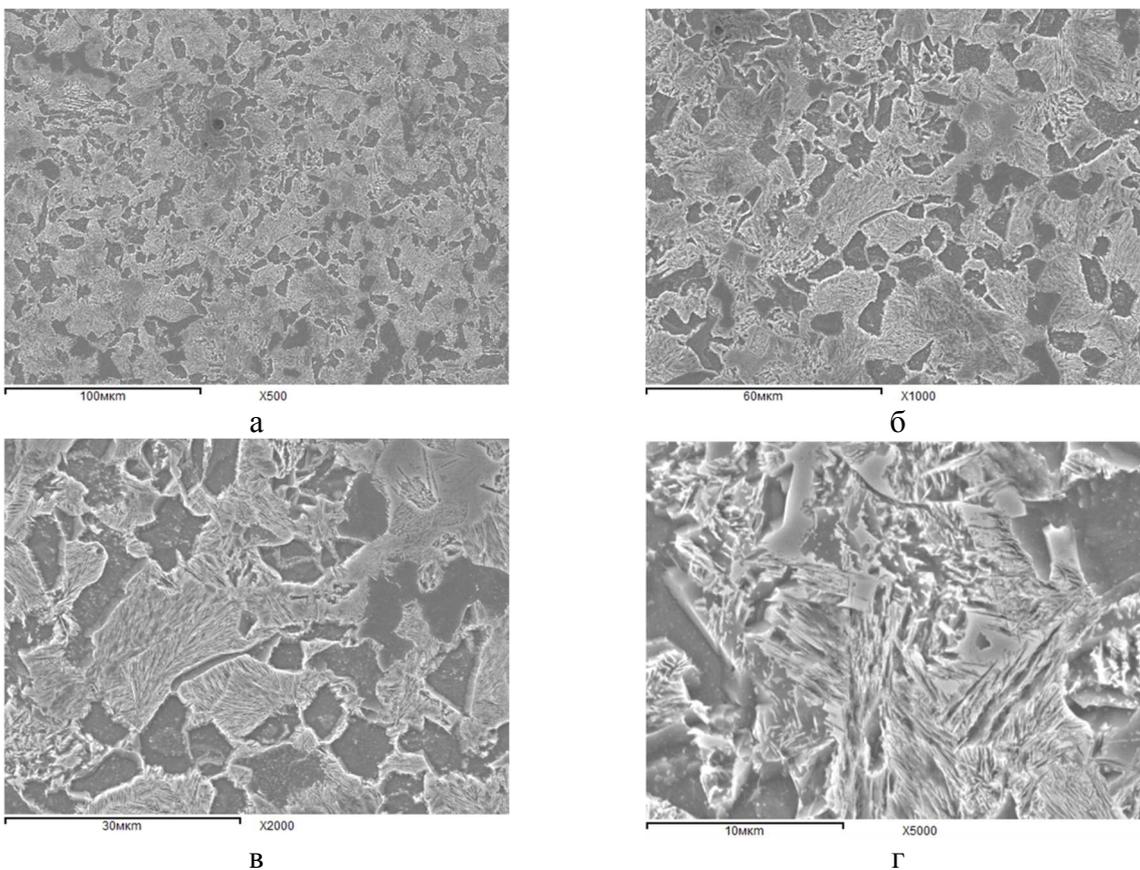


Рисунок 9. Вид микроструктуры образца проката диаметром 22 мм из стали 42CrMo4 (СЭМ) (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №3

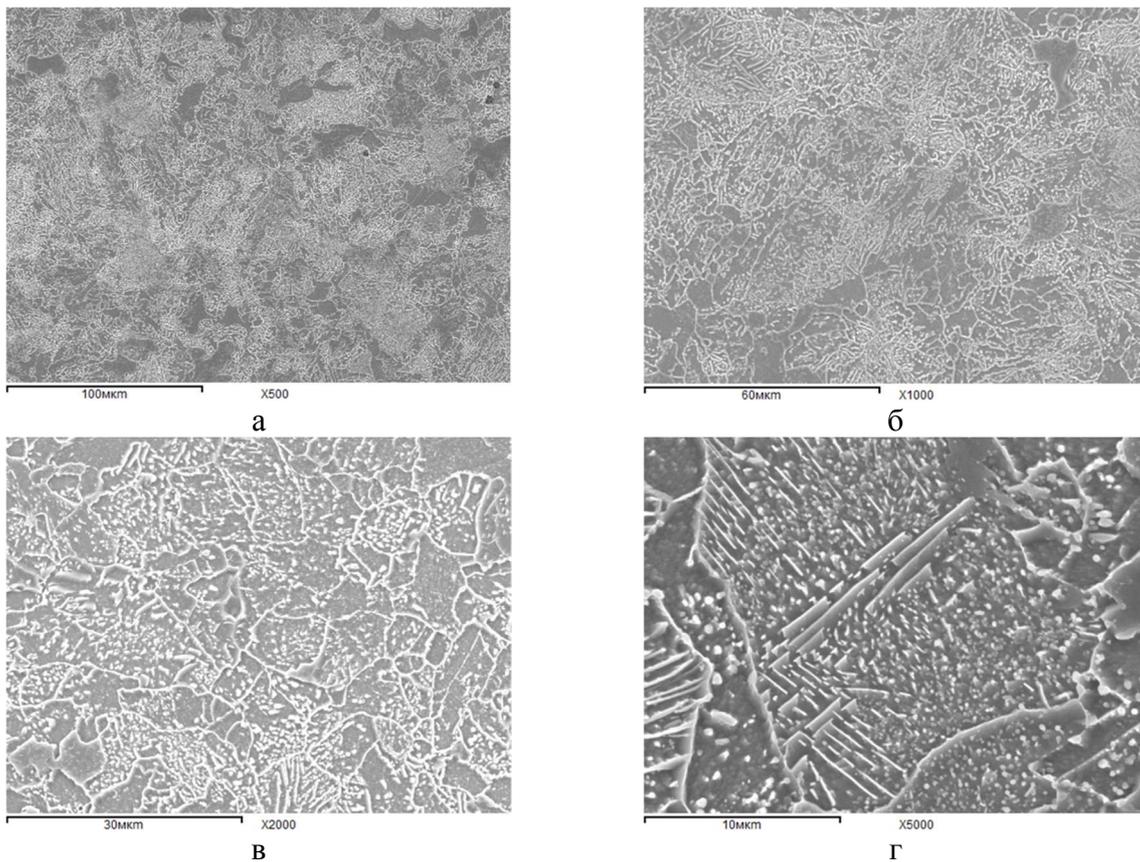


Рисунок 10. Вид микроструктуры образца проката диаметром 18 мм из стали 42CrMo4 (СЭМ) (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №4

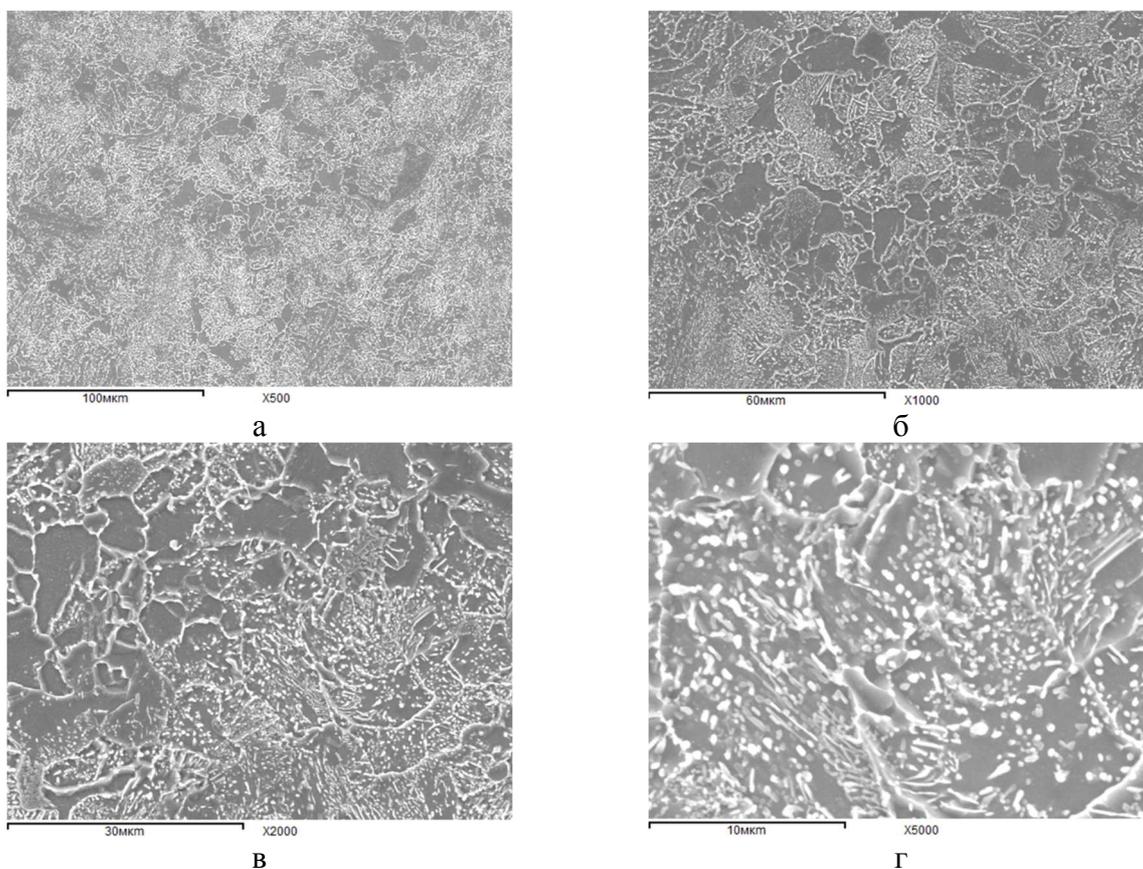


Рисунок 11. Вид микроструктуры образца проката диаметром 22 мм из стали 42CrMo4 (СЭМ) (а – х500, б – х1000, в – х2000, г – х5000) после отжига по режиму №4

Из данных представленных в таблице 6 и рисунках 4 – 11 следует, что режимы №1 и №3 (таблица 2) показали наименьшую эффективность. После сфероидизирующего отжига по этим режимам доля зернистого перлита не превышает 5%. Видно, что выдержка при температурах ниже  $A_{c1}$  на  $44^{\circ}C$  или выше  $A_{c1}$  на  $16^{\circ}C$  практически не приводит к увеличению доли зернистого перлита, даже при отжиге образцов проката диаметром 18 мм обладающих исходной бейнитной структурой. Выдержка металла при температуре чуть ниже  $A_{c1}$  (режим 2) позволила достичь глобализации 35-40% перлита. Поскольку температура выдержки практически соответствовала температуре  $A_{c1}$ , дальнейшее увеличение доли глобулярного перлита без перехода в двухфазную область возможно только при увеличении продолжительности отжига. Показано, что изменение структурного состояния перед сфероидизирующим отжигом не позволяет существенно увеличить долю зернистого перлита. Максимальная доля сфероидизированного перлита получена при отжиге по режиму, в котором осуществлен нагрев до температуры двухфазной области, с последующим медленным охлаждением до температуры ниже  $A_{c1}$  на  $54^{\circ}C$ . При неизменной продолжительности отжига (4 часа) удалось повысить эффективность протекания сфероидизации перлита с 5-40% до 60-70 %.

Результаты определения механических свойств круглого проката диаметром 18 мм и 22 мм из стали марки 42CrMo4 по-

сле сфероидизирующего отжига по экспериментальным режимам (таблица 2) представлены в таблице 7.

Из данных таблицы 7 следует, что механические свойства образцов проката, удовлетворяющие требованиям EN10263-4, разработанным ТУ достигаются только при использовании режима сфероидизирующего отжига № 4, в котором осуществлен нагрев выше  $A_{c1}$  на  $16^{\circ}C$  с последующим медленным охлаждением до температуры ниже положения двухфазной области.

#### 2.4. Оценка прокаливаемости

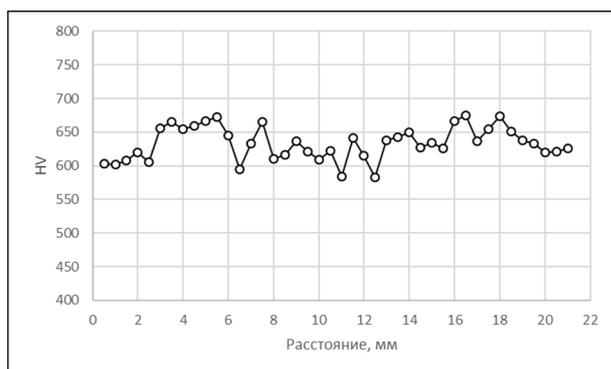
С целью оценки прокаливаемости исследуемого горячекатаного проката из стали марки 42CrMo4, производили закалку в масло образцов круглого проката длиной 120 мм диаметром 22 мм после выдержки при температуре  $850^{\circ}C$  и  $900^{\circ}C$  в течение 1 часа. После закалки из срединной части закаленных образцов изготовили микрошлифы и определяли микротвердость по всему поперечному сечению с шагом 0,5 мм. Полученные результаты представлены на рисунке 12.

Из данных рисунка 12 следует, что мартенситное превращение стали при закалке в масло протекало по всему поперечному сечению круглого проката диаметром 22 мм. Полученные значения твердости находятся в интервале от 53 до 58 HRC, что полностью удовлетворяет требованиям к стали марки 42CrMo4 в соответствии с EN10263-4 и разработанным ТУ. Установлено, что аустенизация при температуре  $900^{\circ}C$  снижает среднее и минимальное значения твердости.

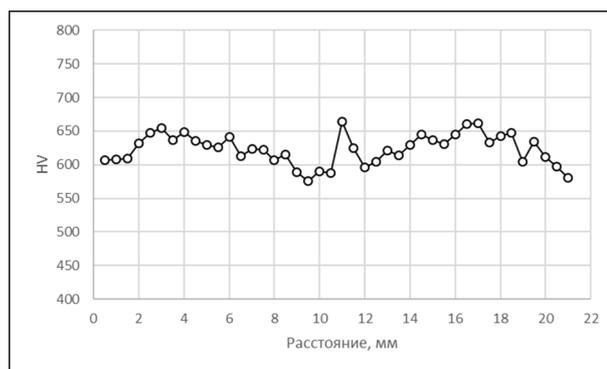
Таблица 7

Механические свойства образцов проката из стали марки 42CrMo4 после сфероидизирующего отжига по экспериментальным режимам

Образец №	Диаметр, мм	Режим сфероидизирующего отжига №	Механические свойства после сфероидизирующего отжига			
			$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
м14	18	1	490	710	14,5	65
м15	22	1	360	650	19,5	53
м16	18	2	440	650	18,5	65
м17	22	2	435	630	18,5	65
м18	18	3	525	960	11,0	40
м19	22	3	445	910	11,0	37
м20	18	4	315	580	21,0	67
м21	22	4	350	580	22,0	68



а



б

Рисунок 12. Микротвердость по поперечному сечению образцов проката из стали марки 42CrMo4 диаметром 22 мм: а – 850°C, б – 900°C

### 2.5. Оценка возможности производства высокопрочных крепежных изделий

Для оценки возможности изготовления высокопрочных крепежных изделий из проката из стали марки 42CrMo4 проводили закалку и отпуск образцов круглого проката диаметром 18 и 22 мм при различных температурах. Методика исследования заключалась в следующем. Изготавливали образцы проката диаметром 18 и 22 мм, длиной 120 мм, которые подвергали аустенизации в трубчатой печи при температуре 850°C в течение 1 часа с последующей закалкой в масло. После охлаждения образцов до комнатной температуры осуществ-

ляли их отпуск в трубчатой печи при температурах от 400 до 550°C. Полученные результаты механических испытаний представлены в таблице 8.

Из данных таблицы 8 следует, что из проката из стали марки 42CrMo4 диаметром 18 и 22 мм по прочностным характеристикам существует возможность получения крепежных изделий различных классов прочности, вплоть до 14.9. Однако, как и в случае круглого проката из стали марки 32CrB4, при производстве крепежных изделий самых высоких категорий прочности 12.9, 14.9 существует проблема обеспечения необходимых значений пластичности (относительного удлинения) и, возможно, других свойств металла готовых изделий.

Таблица 8

Результаты механических испытаний образцов проката после отпуска

Образец №	Диаметр, мм	Температура отпуска, °C	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	$\sigma_B$ , Мпа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
м24	18	400	1240	1570	4,9	51
м25	22	400	1290	1510	5,1	48
м26	18	425	1240	1540	5,2	49
м27	22	425	1090	1480	5,5	49
м28	18	450	1300	1430	5,3	51
м29	22	450	1030	1400	6,8	53
м30	18	500	1130	1300	5,7	56
м31	22	500	1020	1270	7,6	55
м32	18	550	1020	1180	9,1	57
м33	22	550	1020	1150	8,5	58

### 3. Обсуждение результатов

Как свидетельствуют представленные выше результаты исследований, произведенный из стали 42CrMo4 круглый прокат, имеет довольно высокие показатели металлургического качества. А именно, содержание неметаллических включений не превышает балла 2,0 по ГОСТ 1778-70. Остаточное общее содержание кислорода не превышает 0,002%, что свидетельствует о его присутствии, в основном, в виде неметаллических включений, в основном представленными алюминатами кальция с присутствием составляющей в виде алюмомагниевого шпинели. Не зафиксировано обогащение осевой зоны проката по содержанию неметаллических включений, кислорода, азота, общее содержание которого характеризуется довольно высоким значением порядка 0,011%. Отмеченное обстоятельство свидетельствует о незначительном развитии ликвационных процессов при кристаллизации и получении стали с довольно однородным составом по объему металла.

Для адекватной трактовки полученных результатов выполнен расчет и анализ условий существования всех возможных типов фазовых выделений в исследуемой стали 42CrMo4. Его выполняли с помощью, разработанной термодинамической, физико-химической модели прогнозирования фазового состава стали [19]. Результаты расчета по описанной модели температурных зависимостей равновесных концентраций фаз, в том числе мольных долей различных карбонитридных выделений и сульфида марганца показаны на рисунке 13.

Как видно из данных рисунка 13 в аустените полученной стали марки 42CrMo4 возможно образование выделений сульфида марганца MnS и нитрида алюминия AlN. В феррите происходит дополнительное образование цементита и карбидов комплексного состава M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Количество образующихся выделений MnS является незначительным из-за низкого содержания серы в стали (таблица 1). Поэтому в прокате из стали марки 42CrMo4 раскатанные выделения MnS не зафиксированы. По всей видимости, они

имеют сферическую форму и малый размер. Это также хорошо согласуется с установленным менее интенсивным развитием ликвационных процессов. В пользу последнего обстоятельства говорит тот факт, что найденное содержание азота в осевой зоне проката ниже, чем в при поверхностной области (см. табл.5). Формирование выделений AlN имеет значительные кинетические затруднения, поэтому может не успевать происходить при горячей прокатке стали. Таким образом, путем расчета с использованием разработанного термодинамического метода фазового состава исследуемой стали установлены закономерности формирования разных типов неметаллических включений (выделений), которые хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования характеристик присутствующих неметаллических включений (выделений).

С использованием разработанного метода прогнозирования кинетики превращения переохлажденного аустенита с образованием разных типов структурных составляющих выполнен расчет их доли в формирующейся структуре стали [20]. Полученные результаты представлены в таблице 9.

Как видно из данных таблицы 9 при скоростях охлаждения 0,1-0,3 °C/с, обычно имеющих место при производстве круглого проката, в исследуемой стали должно происходить формирование ферритно-перлитной смеси с высокой долей феррита, что затрудняет протекание процесса сфероидизации перлита, в том числе из-за торможения диффузионных процессов присутствующим в ее составе молибденом. Для образования бейнита, как правило, благоприятствующего процессу сфероидизации необходима более высокая скорость охлаждения. Тем не менее, для проката диаметром 22 мм зафиксировано формирование феррито-перлитной, а диаметром 18 мм – бейнитной структуры. Отмеченное расхождение с результатами прогноза (таблица 9), по всей видимости, может быть связано, как с более высокой скоростью охлаждения при производстве проката диаметром 18 мм, так

и с присутствием определенной погрешности расчета доли разных структурных составляющих в стали.

Все изученные режимы сфероидизирующего отжига можно квалифицировать по трем основным зонам исследованных температур: I - ниже  $A_{c1}$  на 50-55°C, II – ниже  $A_{c1}$  на 10-15°C, III – выше  $A_{c1}$  на 5-20°C. Из полученных данных следует, что отжиг в областях I и III не позволяет эффективно сфероидизировать пластинчатый перлит. Выдержка металла в области II за 4 часа позволяет получить долю глобулярного перлита до 35%. Обнадеживающие результаты получены при нагреве проката до температур области III с последующим постоянным медленным охлаждением в область температур I. Это позволяет заметно

ускорить процесс сфероидизации перлита и получать до 60 – 70% его в глобулярной форме. Причем исходное структурное состояние металла ферритно-перлитное или бейнитное не оказывает решающее влияние на получаемую долю глобулярного перлита. При использовании рассмотренного режима отжига получены близкие результаты по сфероидизации перлита в прокате из стали 32CrV4 [18]. Это, по всей видимости, может быть свидетельством в пользу заключения, что наиболее благоприятные условия для сфероидизации выделений цементита реализуются при его растворении в аустените и последующем выделении в процессе медленного охлаждения.

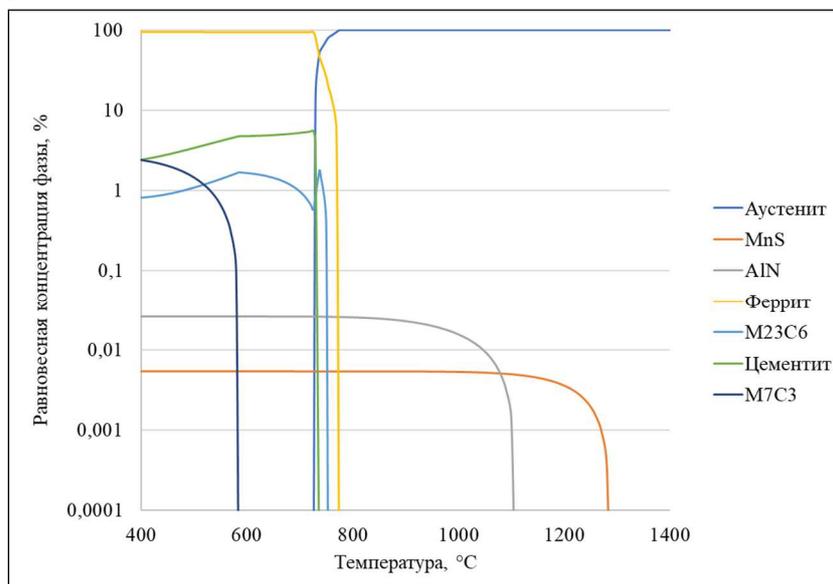


Рисунок 13. Результаты расчета равновесных температурно-концентрационных областей содержания различных фаз в стали марки 42CrMo4 полученного химического состава

Таблица 9

Расчетные доли структурных составляющих, формирующихся при охлаждении с заданной скоростью проката из стали марки 42CrMo4 полученного химического состава

Скорость охлаждения, °C/c	Доля феррита, %	Доля перлита, %	Доля бейнита, %	Доля мартенсита, %
0,05	39	61	0	0
0,06	37	63	0	0
0,07	34	66	0	0
0,08	33	67	0	0
0,09	31	69	0	0
0,1	31	69	0	0
0,2	27	73	0	0
0,3	26	74	0	0
0,4	25	75	0	0
0,5	25	56	19	0
0,6	24	33	42	0
0,7	25	20	55	0

Определяющее влияние на показатели механических свойств производимых высокопрочных крепежных изделий оказывают параметры аустенизации, закалки и последующего отпуска стали. Полученные результаты показывают, что их варьирование приводит к изменению прочностных характеристик, твердости, относительного удлинения, сужения в довольно широких пределах. Возможно достижение необходимого набора значений прочностных характеристик, соответствующих ряду классов прочности вплоть до 14.9. Однако повышение прочности приводит к закономерному снижению пластичности (относительного удлинения) стали. Общая закономерность состоит в том, что снижение температуры отпуска повышает прочность и твердость, но снижает пластичность стали. В том числе, полученные по исследованным режимам закалки и отпуска величины относительного удлинения несколько ниже требуемых для класса прочности крепежных изделий 12.9. Это свидетельствует о целесообразности проведения дополнительных исследований в этом направлении с изучением изменения параметров аустенизации, закалки и отпуска в более широких диапазонах значений.

### Заключение

Установлено, что глубина обезуглероженного слоя в горячекатаном прокате из стали марки 42CrMo4 составляет не более 0,6 – 07% и полностью удовлетворяет требованиям разработанных ТУ. Содержание неметаллических включений не превышает балла 2,0 по ГОСТ 1778-70, что свидетельствует о выполнении требований разработанных ТУ.

Найдено, что наиболее эффективный режим сфероидизирующего отжига горячекатаного проката из стали марки 42CrMo4 состоит в нагреве до температуры двухфазной области 760°C (на 16°C выше  $A_{c1}$ ), с последующим постоянным медленным охлаждением до температуры 690°C (ниже  $A_{c1}$  на 54°C). При неизменной продолжительности отжига (4 часа) это позволяет повысить степень протекания сфероидизации перлита с 5-40% до 60-70 %. Установлено,

что механические свойства проката из стали марки 42CrMo4, удовлетворяющие требованиям EN10263-4 и разработанных ТУ, достигаются только при использовании представленного выше оптимального режима сфероидизирующего отжига.

Сталь марки 42CrMo4 обладает высокими показателями прокаливаемости и мартенситное превращение при закалке в масло протекает по всему поперечному сечению круглого проката диаметром 18 и 22 мм. Полученные значения твердости находятся в интервале от 53 до 58 HRC, что полностью удовлетворяет требованиям к стали марки 42CrMo4 в соответствии с EN10263-4 и разработанным ТУ.

Путем расчета, с использованием разработанного термодинамического метода, фазового состава исследуемой стали установлены закономерности формирования разных типов неметаллических включений (выделений), которые хорошо согласуются с экспериментально полученными данными. На основе результатов прогнозирования кинетики превращения переохлажденного аустенита с образованием разных типов структурных составляющих установлено формирование при производстве круглого проката в исследуемой стали 42CrMo4 ферритно-перлитной смеси с высокой долей феррита, что совместно с торможением диффузионных процессов присутствующим в ее составе молибденом, затрудняет протекание процесса сфероидизации перлита.

Установлено, что на прокате из стали марки 42CrMo4 диаметром 18 и 22 мм возможно достижение необходимого набора значений прочностных характеристик, соответствующих ряду классов прочности вплоть до 14.9. Однако, повышение прочности приводит к закономерному снижению пластичности (относительного удлинения) стали. Общая закономерность состоит в том, что снижение температуры отпуска повышает прочность и твердость, но снижает пластичность стали. В том числе, полученные по исследованным режимам закалки и отпуска величины относительного удлинения несколько ниже требуемых для класса прочности крепежных изделий

12.9. Это свидетельствует о целесообразности проведения дополнительных исследований в этом направлении с изучением изменения параметров аустенизации, закалки и отпуска в более широких диапазонах значений.

#### Библиографический список

1. Pachurin G.V., Fillipov A.A. and Mukhina M.V. Rolled stock structure preparation for cold forging of pearlite steel grades. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 969, 012010 (2020). doi:10.1088/1757-899X/969/1/012010/metal
2. Влияние микроструктуры и поверхностных дефектов на способность круглого проката из специальных легированных сталей к холодной осадке / Степанов А.Б., Арутюнян Н.А., Ивин Ю.А. и др. // *Металлург*. 2016. №7. С. 66-72.
3. Filipov A.A., Pachurin G.V., Goncharova D.A., Nuzhdina T.V., Mukhina M.V., Katkova O.V., Matveev U.I. and Tsapina T.N. Structural and mechanical maintenance of quality of the rolled stock for cold upsetting of metal articles. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 632, 012010 (2019). doi:10.1088/1757-899X/632/1/012010
4. Pang X.P., Hu Y., Tang S.L., Xiang Z., Wu G., Xu T. and Wang X.Q. Physical properties of high-strength bolt materials at elevated temperatures. *Results in Physics*. 13, 102156 (2019). doi:10.1016/j.rinp.2019.102156
5. O'Brien J.M. and Hosford W.F. Spheroidization cycles for medium carbon steels. *Met. Mater. Trans. A*. 33, 1255-1261 (2002). doi:10.1007/s11661-002-0226-y.
6. Ji C., Wang L. and Zhu M. Effect of subcritical annealing temperature on microstructure and mechanical properties of SCM435 steel. *J. Iron Steel Res. Int.* 22, 1031-1036 (2015). doi:10.1016/S1006-706X(15)30108-4.
7. Fu Y., Yu H. and Tao P. On-line spheroidization process of medium-carbon low-alloyed cold heading steel. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 21, 26 (2014). doi: 10.1007/s12613-014-0861-5
8. Lundberg S.E. A vision of wire rod rolling technology for the twenty first century. *Adv. Mater. Res.* 23, 39-44 (2007). doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.23.39
9. Arruabarrena J., López B. and Rodriguez-Ibabe J.M. Influence of prior warm deformation on cementite spheroidization process in a low-alloy medium carbon steel. *Metall. Mater. Trans. A*. 45, 1470-1484 (2014). doi:10.1007/s11661-013-2066-3
10. Jirkova H., Hauserova D., Kueerova L. and Masek B. Energy – and – time – saving low-temperature thermomechanical treatment of low-carbon plain steel. *Mater. Technol.* 47, 335-339 (2013). Available at: <http://mit.imt.si/izvodi/mit133/jirkova.pdf>
11. Долженков И. Е. О морфологии карбидной фазы в сталях для производства метизов и другой металлопродукции холодной деформацией // *Сталь*. 2011. № 11. С. 106.
12. Гуль Ю.П., Соболенко М.А., Ивченко А.В. Комплексная интенсификация сфероидизирующего отжига низкоуглеродистых сталей для холодной высадки // *Сталь*. 2012. №6. С. 44-47.
13. Wang B., Liu Zy., Zhou Xg. and Wang Gd. Improvement of hole-expansion property for medium carbon steels by ultra fast cooling after hot strip rolling. *J. Iron Steel Res. Int.* 20, 25-32 (2013). doi:10.1016/S1006-706X(13)60107-7
14. Karadeniz E. Influence of different initial microstructure on the process of spheroidization in cold forging, *Mater. Des.* 29, 251-256 (2008). doi:10.1016/j.matdes.2006.11.015
15. Влияние режима температурно-деформационной обработки специальных легированных сталей на структурное состояние и свойства проката / Колдаев А.В., Амежнов А.В., Зайцев А.И. и др. // *Металлург*. 2017. №10. С. 30-34.
16. Maity J., Saha A., Mondal D.K. and Biswas K. Mechanism of accelerated spheroidization of steel during cyclic heat treatment around the upper critical temperature. *Phil. Mag. Lett.* 93, 231-237 (2013). doi:10.1080/09500839.2012.758390

17. Saha A., Mondal D.K. and Maity J. An alternate approach to accelerated spheroidization in steel by cyclic annealing. *J. of Materi Eng and Perform.* 20, 114–119 (2011). doi:10.1007/s11665-010-9653-x
18. Stepanov A., Koldaev A., Arutyunyan N., Zaitsev A. Evolution of the structural state and properties of 32CrB4 steel during the production of high-strength fasteners. *Metals.* 12, 366 (2022). doi:10.3390/met12020366
19. Шапошников Н.Г., Родионова И.Г., Павлов А.А. Термодинамическое конструирование коррозионностойких сталей аустенито-мартенситного класса, предназначенных для плакирующего слоя биметалла // *Металлург.* 2015. № 12. С. 45-50.
20. Колдаев А.В. Закономерности выделения избыточных фаз в низкоуглеродистых микролегированных сталях и их влияния на комплекс служебных свойств: дис. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Москва, 2016. 150 с.

---

*Information about the paper in English*

**D.P. Kanaev, V.M. Tagirova,  
A.A. Sokolov, M.V. Zaitseva**  
OJSC Magnitogorsk Metalware and Sizing Plant (MMK-METIZ)  
Magnitogorsk, Russia  
**A.I. Zaitsev, A.V. Koldaev,  
A.B. Stepanov, N.A. Arutyunyan**  
Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy  
E-mail: aizaitsev1@yandex.ru  
Received 09.06.2022

STUDY ON REGULARITIES OF THE EVOLVING STRUCTURAL CONDITION AND PROPERTIES OF  
STEEL GRADE 42CRMO4, WHEN PRODUCING HIGH-STRENGTH FASTENERS

**Abstract**

The industrial specimens of round bars, 18 mm and 21 mm in diameter, from steel grade 42CrMo4 were studied for regularities of the forming and evolving structural condition and properties of steel, when carrying out the integrated technology of producing long products and downstream manufacturing of fasteners by cold upsetting methods. When conducting the study, the authors applied light and scanning electron microscopy methods, local X-ray spectral analysis, tested mechanical properties, measured hardness, determined total oxygen and nitrogen content, and used the thermodynamic and kinetic simulation and calculation methods. At the stage of manufacturing long products, the authors studied characteristics of the metallurgical quality of steel, including a decarburized layer, non-metallic inclusions (precipitates), and content uniformity in steel. The stage of steel preparation for cold upsetting is determined by the dependencies between the degree of spheroidizing a ferrite-pearlite structure and mechanical properties, and the spheroidizing annealing mode for rolled products. Finally, at the stage of producing fasteners, the regularities of achieving mechanical properties were determined depending on steel annealing and tempering parameters.

**Keywords:** 42CrMo4, round bars, spheroidizing annealing, microstructure, globular pearlite, mechanical properties, metallurgical quality, annealing and tempering, high-strength fasteners.

---