

УДК 669.017:621.771:25:669.141.24

**Борисенко А. Ю., Воробей С. А., Бадюк С. И., Токмаков П. В., Посыпайко И. Ю., Клиновая О. Ф.**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК МАЛЫХ СЕЧЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ ЗАГОТОВКИ. Часть I**

Катанка из углеродистых сталей служит заготовкой для производства многих видов металлических изделий различного назначения. Однако удовлетворить все потребности современного рынка метизного производства катанкой массового производства весьма сложно. Основной причиной этого является то, что при устоявшейся технологии производства катанки освоение ее новых видов, обладающих специальными свойствами, или из других марок стали, но, требующихся в небольшом количестве, нерентабельно. В настоящее время актуально создание малых металлургических предприятий производительностью менее 100 тыс. тонн продукции в год [1]. Основная концепция таких предприятий – выпуск небольших объемов продукции, часто со специальными свойствами, которые необходимы ограниченному числу заказчиков, при малых удельных капитальных затратах производства.

Получить проволочную заготовку можно не путем прокатки слитков большого размера в катанку, а способом непрерывной разливки, реализуя идею максимально возможного приближения размеров исходной непрерывнолитой заготовки к размерам готовой продукции. Актуальность уменьшения поперечного сечения непрерывно–литого слитка заключается в снижении энергозатрат на его последующую прокатку. Произведенную таким способом продукцию отождествлять с катанкой в принятом ее толковании [2] трудно. По сути своего назначения и технологии производства эту продукцию можно назвать «непрерывнолитой проволочной заготовкой» (НЛПЗ).

В современных технологиях производства катанки, например, диаметром 5,5 мм из углеродистых сталей используются непрерывно–литые заготовки сечением от 120 × 120 мм до 160 × 160 мм или перекатанные на заготовочном стане непрерывно–литые слитки больших сечений (200 – 300 × 300 – 400 мм) в квадратную заготовку размером 120 – 130 мм [3]. Получение катанки таким способом обеспечивает большое накопление деформации стали и существенную проработку ее литой структуры с частичным устранением литейных пороков.

Поскольку производство НЛПЗ основывается на максимальном приближении ее исходного сечения к размеру готовой продукции, то деформационная проработка стали значительно снижается, что может отразиться на ее структуре и свойствах. Получение необходимой микроструктуры стали для достижения требуемых свойств НЛПЗ возможно за счет реализации эффекта структурной наследственности, закладываемой особенностями кристаллизации отливок малых сечений [4]. При этом горячая пластическая деформация (ГПД) при производстве НЛПЗ не исключается. С помощью приводных прокатных валков происходит вытягивание НЛПЗ из кристаллизатора, возможно осуществление режима «мягкого обжатия» для уменьшения осевой ликвации и измельчения первичного зерна, а также придание требуемой чистоты поверхности и точности геометрических размеров заготовки. Производство НЛПЗ подразумевает и значительное снижение энергозатрат, связанных с горячей прокаткой. Очевидно, что и производительность этого процесса в сравнении с существующим будет отличаться.

Изложенные выше вопросы относительно новы и требуют всесторонней проработки. Важным этапом этой работы являются исследования структуры стальных отливок малых сечений после кристаллизации, термической обработки и ГПД. Необходимо также оценить приблизительную эффективность производства НЛПЗ по сравнению с существующими технологиями производства катанки.

Настоящая работа отражает первую часть исследований в этом направлении, посвященных изучению микроструктуры стальных отливок малых сечений. Ее актуальность обусловлена тем, что микроструктура, определяя свойства стали, служит важным показателем качества металлопродукции. Поэтому микроструктура отливок малых сечений должна быть на уровне микроструктуры катанки произведенной традиционным путем.

Целью работы является определение возможности достижения в отливках малых сечений микроструктуры подобной микроструктуре катанки, получаемой по существующей технологии из сталей, близких химических составов.

Исследования выполнены на образцах стальных отливок диаметром 6,1; 6,4; 10,2 мм (рис. 1), полученных в лабораторных условиях путем расплавления шихтовых материалов и доводки жидкой стали до требуемого состава в 50-килограммовой индукционной установке ЛПЗ-67. Химический состав полученных сталей приведен в табл. 1. Кристаллизацию отливок от температуры жидкой стали (1600 °С) осуществляли в кварцевых трубках с толщиной стенки 1,5 мм. Трубки заполнялись жидкой сталью путем ее эжекционного втягивания из муфеля печи с помощью резиновой груши.

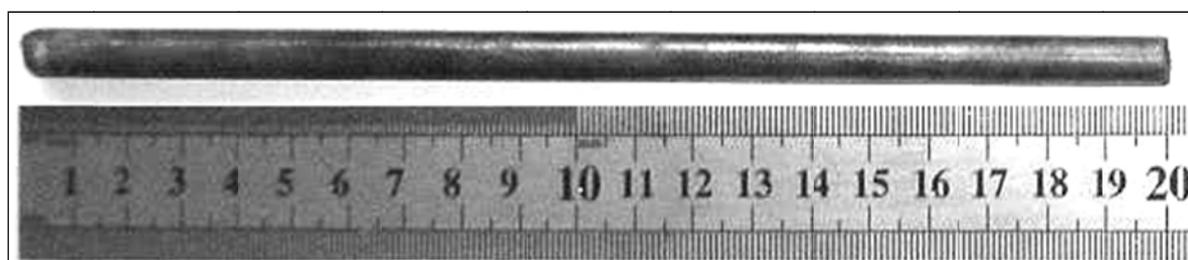


Рис. 1. Типичный внешний вид стальной отливки малого сечения ( $\varnothing$  6,4 мм).

Таблица 1

Химический состав стали опытных отливок малых сечений

Диаметр, мм	Содержание химических элементов, % (мас.)								
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Cu
6,1	0,25	0,96	0,59	0,012	0,009	0,034	0,21	0,07	0,08
6,4	0,67	0,24	0,47	0,011	0,008	0,27	0,11	0,11	0,07
10,2	0,91	0,06	0,22	0,014	0,015	0,24	0,12	0,1	0,07

С помощью программы LVMFlow [5] было выполнено компьютерное моделирование процессов охлаждения стали при кристаллизации и в твердом состоянии.

Образцы полученных отливок в литом состоянии, после термической обработки и ГПД с отдельного нагрева подвергали микроструктурным исследованиям по стандартной методике [6].

Термическую обработку осуществляли по режиму: нагрев до 1000 °С, прогрев из расчета 1 минута на 1 мм сечения образца; выдержка 5 минут; охлаждение на воздухе.

ГПД отливок выполнялась прокаткой на лабораторном стане дуо 280 за один проход со степенью деформации ~50 %. Температура нагрева литых образцов составляла 1000 °С; время прогрева определялось из расчета 1 минута на 1 мм сечения; выдержка 5 минут. Скорость прокатки составляла 53 м / мин.

Моделирование процессов охлаждения стальных отливок (рис. 2) позволило получить ориентировочные данные о скоростях их охлаждения при кристаллизации в интервале ~1600–1400 °С. Средняя расчетная скорость охлаждения в указанном температурном интервале при условии заливки стали в кварцевую трубку с температурой 20 °С составила около 200°С/с.

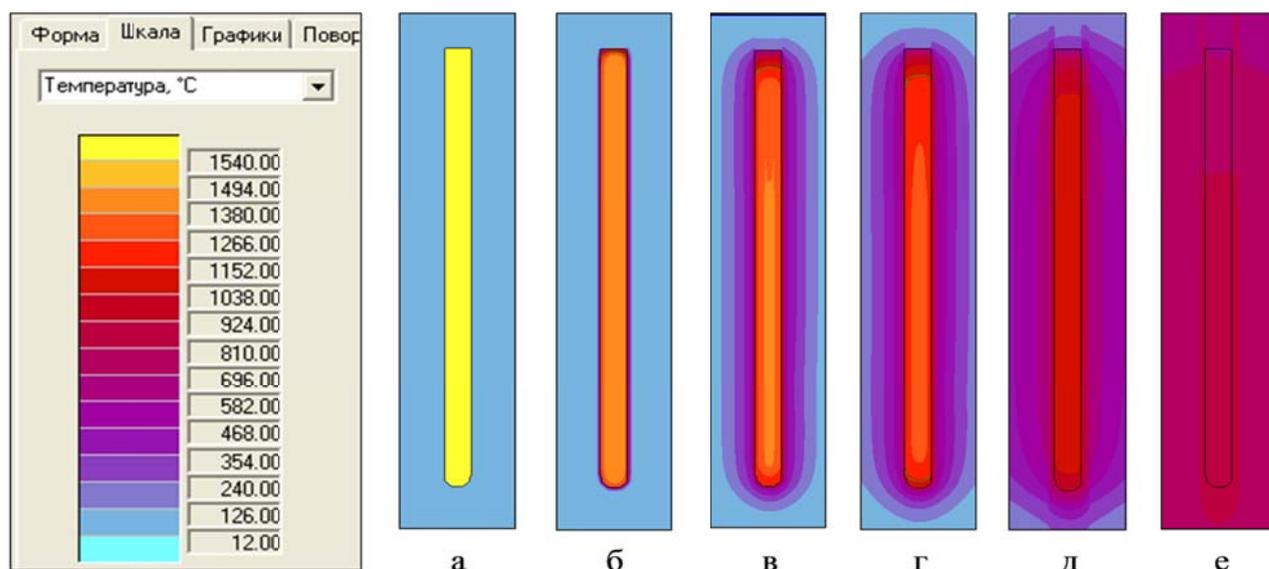


Рис. 2. Распределение температуры в стальной стержневой отливке  $\varnothing 6,4$  мм, охлаждающейся в кварцевой трубке от температуры жидкой стали, в разные моменты времени:

а – 0 с, 1600 °С; б – 0,32 с, 1498 °С; в – 1 с, 1410 °С; г – 2 с, 1311 °С; д – 4 с, 1121 °С; е – 40 с, 867 °С.

Исследования структуры опытных отливок показали, что для них характерны общие закономерности формирования внутреннего строения металлических слитков – образование зонного строения и осевой рыхлости. В отливке наибольшего диаметра вероятность получения осевой несплошности оказалась выше, чем в отливках меньшего сечения. Причина этого – плохо контролируемый «ручной» процесс эжекционного забора жидкой стали в кварцевые трубки. В результате чего заполнение расплавом трубок меньшего диаметра было полнее, что способствовало формированию более плотных отливок, чем в случае использования трубок большего диаметра. Так как сплошность полученных отливок зависела от условий эксперимента и являлась субъективным фактором, то на данном этапе исследований основное внимание было обращено только на микроструктуру стали – важного показателя возможности получения качественной литой проволоочной заготовки.

В отливке  $\varnothing 6,1$  мм из стали с 0,25 % С наблюдаются две структурные зоны, выявляемые по ориентации границ зерен, окаймленных ферритной сеткой: зона столбчатых кристаллов, ориентированных от поверхности к центру отливки, и зона относительно равноосных кристаллов, расположенная в центре. Структура стали – ферритно-перлитная, количество феррита до 10 % (рис. 3, а, б).

В отливке  $\varnothing 6,4$  мм из стали с 0,67 % С выявить структурные отличия, связанные с ее зональным строением, не удалось, так как количество доэвтектоидного феррита, по которому оцениваются ориентация и размер бывших аустенитных зерен незначительно (до 1%). Структура стали – преимущественно перлит 1-го балла по ГОСТ 8233 (рис. 3, в, г).

Наибольшие отличия в микроструктуре по сечению опытных отливок наблюдаются в образце  $\varnothing 10,2$  мм из стали с 0,91 % С, (рис. 3, д, е) с наибольшей внутренней полостью. Особенностью микроструктуры этой отливки является образование повышенного (по диаграмме Fe–C) количества заэвтектоидного цементита, выделяющегося в виде сетки и прямолинейных игл (пластин), в области, прилегающей к осевой полости. Еще большие отклонения в структуре этой отливки от структуры, соответствующей равновесному состоянию, наблюдаются в ее поверхностной зоне, где одновременно присутствуют заэвтектоидный цементит и доэвтектоидный феррит (рис. 3, е). В структуре преобладает перлит первого балла. В целом структура всех исследованных отливок, при условии достижения их сплошности,

характеризується рівномірністю по сеченню і високою дисперсністю перліта – основної структурної складової. Важним результатом досліджень являється відсутність в отливках закалочних структур, незважаючи на великі швидкості охолодження. Це дуже важливо для якості металопродукції, в частині – високоуглеродистої катанки, призначеної для виготовлення високопрочної проволочки, маючої велику міцність і пластичність. Наблюдаємі особливості мікроструктури в отливках малих сечень пов'язані з процесами їх кристалізації і наступного охолодження, основні з яких: 1 – швидкість утворення первинних фаз ( $\delta$ -,  $\gamma$ -Fe); 2 – розподіл домішних елементів при утворенні первинних фаз; 3 – будова між- і внутріфазних меж; 4 – особливості формування і релаксації напружень в отливках, що призводять до фрагментації первинних фаз і утворенню зернистої структури сталі; 5 – умови розпаду аустеніта.

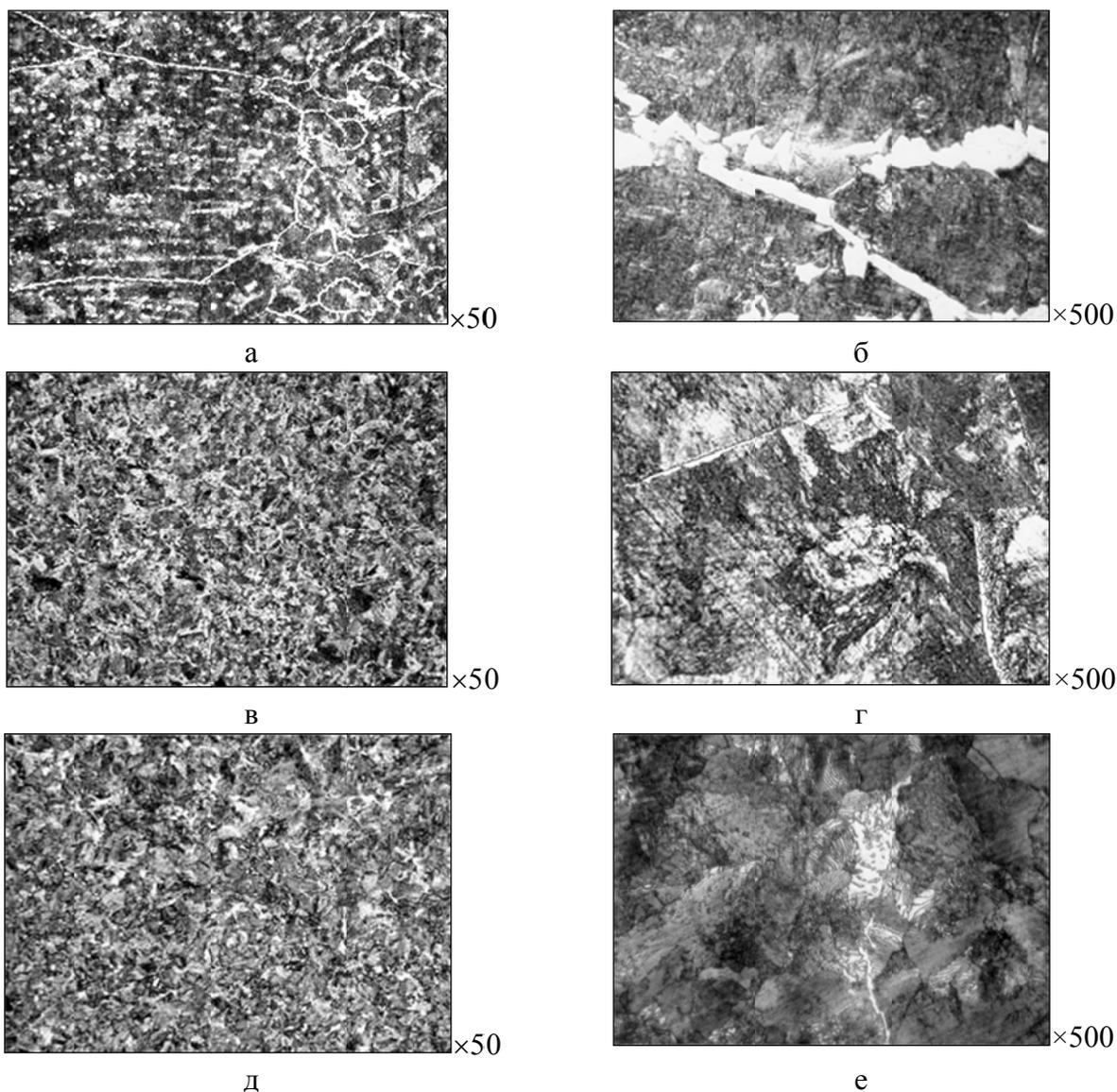


Рис. 3. Мікроструктура отливок малих сечень в литому стані:  
а, б –  $\varnothing$  6,1 мм, 0,25 % С; в, г –  $\varnothing$  6,4 мм, 0,67 % С; д, е –  $\varnothing$  10,2 мм, 0,91 % С.

Особливості литої структури отливок малих сечень позитивно проявляють себе після наступної термічної обробки або ГПД. Дослідження показали (рис. 4), що термічна обробка і ГПД призводять до зміненню кількісних при збереженні

качественных характеристик микроструктуры относительно их исходного литого состояния. Наиболее ярко это наблюдается в стали с 0,25 % С, благодаря контрасту измельчающейся ферритно-перлитной структуры: количество феррита увеличивается до ~60 % и уменьшаются размер зерна (по ГОСТ 5639) от первого до второго баллов (рис. 3, а) в литом состоянии, от девятого до десятого баллов после термической обработки и от одиннадцатого до двенадцатого балла – после ГПД (рис. 4, а, б).

В образцах из стали с 0,67 % С и 0,91 % С после термической обработки и особенно ГПД также наблюдается измельчение перлитных зерен при сохранении высокой дисперсности перлита, определенной визуально по ГОСТ 8233, на уровне первого – второго баллов (рис. 4, в – е). При этом размер зерна в стали с 0,67 % С, определяемый по ферритной сетке, после термической обработки составляет четвертый – пятый баллы, а после ГПД – седьмой–восьмой баллы. Наблюдается разная морфология феррита, образующегося после термической обработки и ГПД, при приблизительно одинаковом его количестве (до 3 %). После термической обработки пограничные образования феррита относительно широкие и продолговатые, тогда как после ГПД феррит распределен более равномерно по границам зерен в виде небольших островков (рис. 4, в, г).

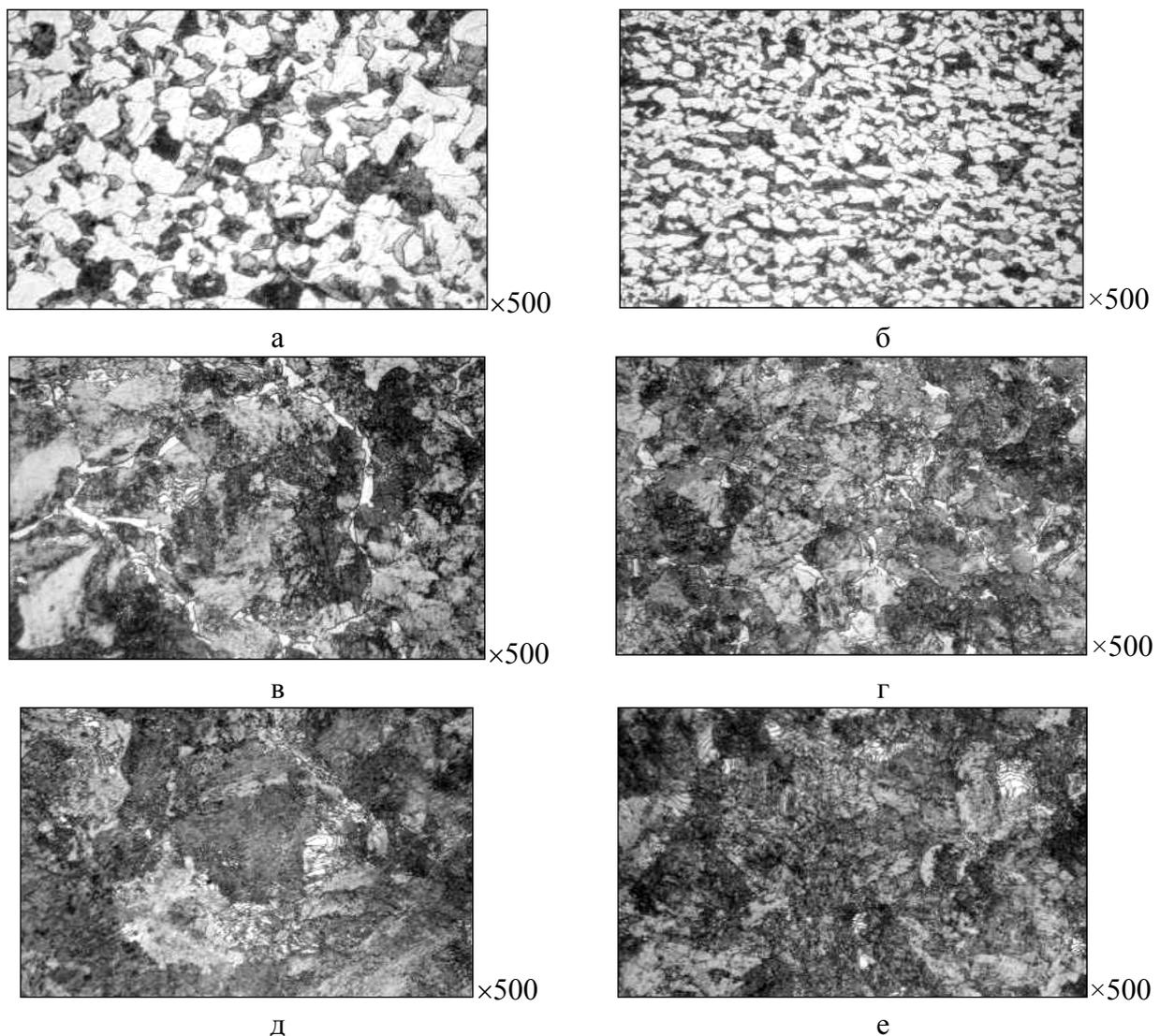


Рис. 4. Микроструктура отливок малых сечений после термической обработки (а, в, д) и ГПД (б, г, е):

а, б – сталь с 0,25 % С; в, г – сталь с 0,67 % С; д, е – сталь с 0,91 % С.

Микроструктура отливок из сталей с 0,67 % и 0,91 % С после ГПД близка к микроструктурам высокоуглеродистой катанки из стали 70 (0,69 % С, 0,53 % Мп, 0,23 % Si) и 90 (0,92 % С, 0,44 % Мп, 0,21 % Si), произведенной по существующим технологиям (рис. 5). Из этого можно сделать предварительный вывод о том, что и свойства отливок малых сечений после ГПД со степенью 50 % должны быть на уровне свойств катанки, производимой по традиционной технологии.

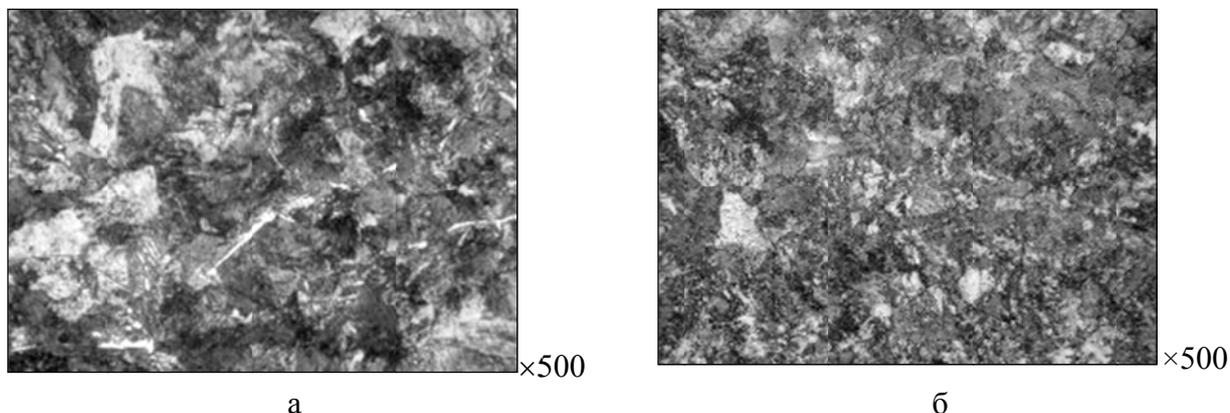


Рис. 5. Микроструктура промышленной катанки  $\varnothing$  5,5 мм из стали марки 70 (а) и 90 (б)

### ВЫВОДЫ

Результаты исследований показывают возможность получения структуры проволочной заготовки, полученной из отливок малых сечений после горячей деформации со степенью 50 %, близкой к структуре катанки соответствующих марок стали, производимой традиционным способом. Значительное диспергирование структуры стали и ее равномерное распределение в отливках малых сечений после термической обработки или ГПД при относительно небольших степенях деформации связано с особенностями их исходного литого строения. Характер полученных структур позволяет предполагать достаточно высокий комплекс механического свойства проката, произведенного по опытной технологии.

Авторы признательны Ю. А. Ему и сотрудникам Национальной металлургической академии Украины (г. Днепропетровск): С. Н. Подгорному, А. С. Попову, Д. В. Лелеко за оказанную помощь в проведении плавки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горизонтальные машины непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] – Режим доступа : [http : //www.mmsv.ru/articles/284/3521/](http://www.mmsv.ru/articles/284/3521/)
2. Толковый металлургический словарь. Основные термины / под ред. В. И. Куманина. – М. : Рус. яз., 1989. – 446 с.
3. Производство высокоуглеродистой катанки на металлургических агрегатах высшего технического уровня / В. И. Тимошпольский [и др.] – Мн. : Бел. наука, 2004. – 239 с.
4. Кондратюк С. Є. Структуроутворення, спадковість і властивості литої сталі / С. Є. Кондратюк. – К. : Наукова думка, 2010 – № 9. – 176 с.
5. Центр поддержки Российских систем компьютерного инжиниринга [Электронный ресурс] / LVM Flow – Режим доступа : [http : //cae.ustu.ru/cont/soft/lvm/lvm.htm](http://cae.ustu.ru/cont/soft/lvm/lvm.htm)
6. Лаборатория металлографии / Е. В. Панченко [и др.] – М. : Металлургия, 1965. – 239 с.