



There are presented and analyzed the data on determination of mechanical characteristics (solidity and plasticity) taking into account their dependence on temperature for alloyed steel grades for the purpose of further use for calculations of thermostressed condition.

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПО «Платан»,
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, БНТУ,
В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ»,
Н. Л. МАНДЕЛЬ, БНТУ

УДК 669.187

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛИ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК, ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Освоение производства новых марок сталей в ходе непрерывной разливки определяет возрастающий уровень требований к сведениям относительно механических свойств в области температур, близких к интервалу температур кристаллизации стали. Подобная специфика требований объясняется необходимостью повышения выхода годного металла и, в первую очередь, обоснования технологических приемов устранения таких дефектов непрерывнолитых заготовок как горячие трещины, отличающиеся большим разнообразием (внешние, внутренние, продольные посередине широких граней стальных слябов, поперечные, угловые, кромочные, звездообразные), холодные трещины, газовые пустоты, пористость и прочих дефектов.

Ниже проанализированы данные по определению таких показателей механических характеристик, как прочность и пластичность применительно к легированным маркам сталей. Получение сведений является одним из необходимых этапов при разработке способов устранения горячих трещин в непрерывнолитых заготовках.

Первые попытки экспериментального определения прочности и пластичности стальных отливок из углеродистой стали при повышенных температурах принадлежат Г. Холлу [1]. В дальнейшем разработанная методика изучения механических свойств получила развитие в работах российских исследователей. Использование экспериментальной установки, предложенной И. И. Лупыревым [2], позволило повысить точность измерений и получить данные о деформации стали при температурах 1470 – 1430 °С. Авторы работы [3] полагают, что при температурах, близких к температуре кристаллизации (1430 – 1470 °С), материал сохраняет упругие свойства, причем величина модуля упругости колеблется в пределах 600 – 800 МПа. Кроме того, приведены данные по определению прочности для наиболее

распространенных марок сталей, в том числе Г13, 1Х13, 30ХНМЛ и 1Х18Н9Т (рис. 1). При этом отмечена высокая прочность стали 1Х18Н9Т (3,5 МПа), что объясняется свойствами хромоникелевого аустенита при повышенных температурах.

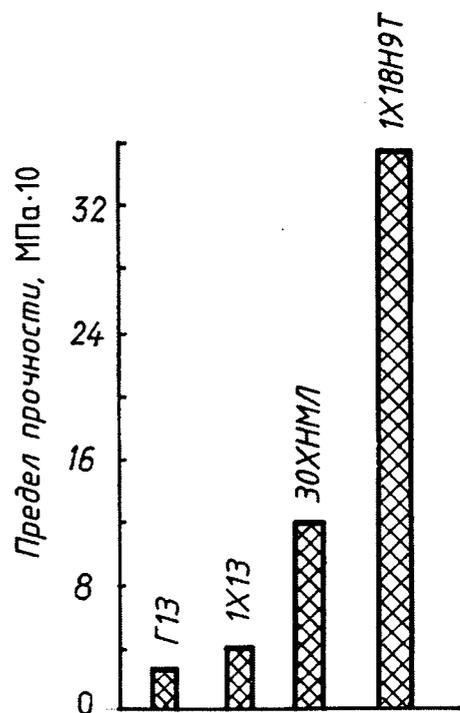


Рис. 1. Прочность стали различных марок по данным [3]

Дальнейшее развитие определения прочности и пластичности стали в условиях затвердевания представлено в работах Н. Н. Гуглина и др. [4–6]. Обсуждая работу [3], Н. Н. Гуглин и Б. Б. Гуляев [5] пришли к выводу о необходимости усовершенствования методики исследований с тем, чтобы обеспечить:

а) увеличение усилий, прикладываемых к образцам, для расширения диапазона температур испытаний и повышения точности определения нагрузок;

б) расположение образца вертикально с целью снижения эффекта торможения металла стенками формы и возможности сифонного подвода металла;
в) применение системы испытаний с разрывом образца в заранее заданный момент времени при отсутствии внешних нагрузок до этого момента;

г) заливки расплава в песчаную форму с последующим остыванием образца в этой же форме.

В соответствии с указанными требованиями была разработана новая экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 2.

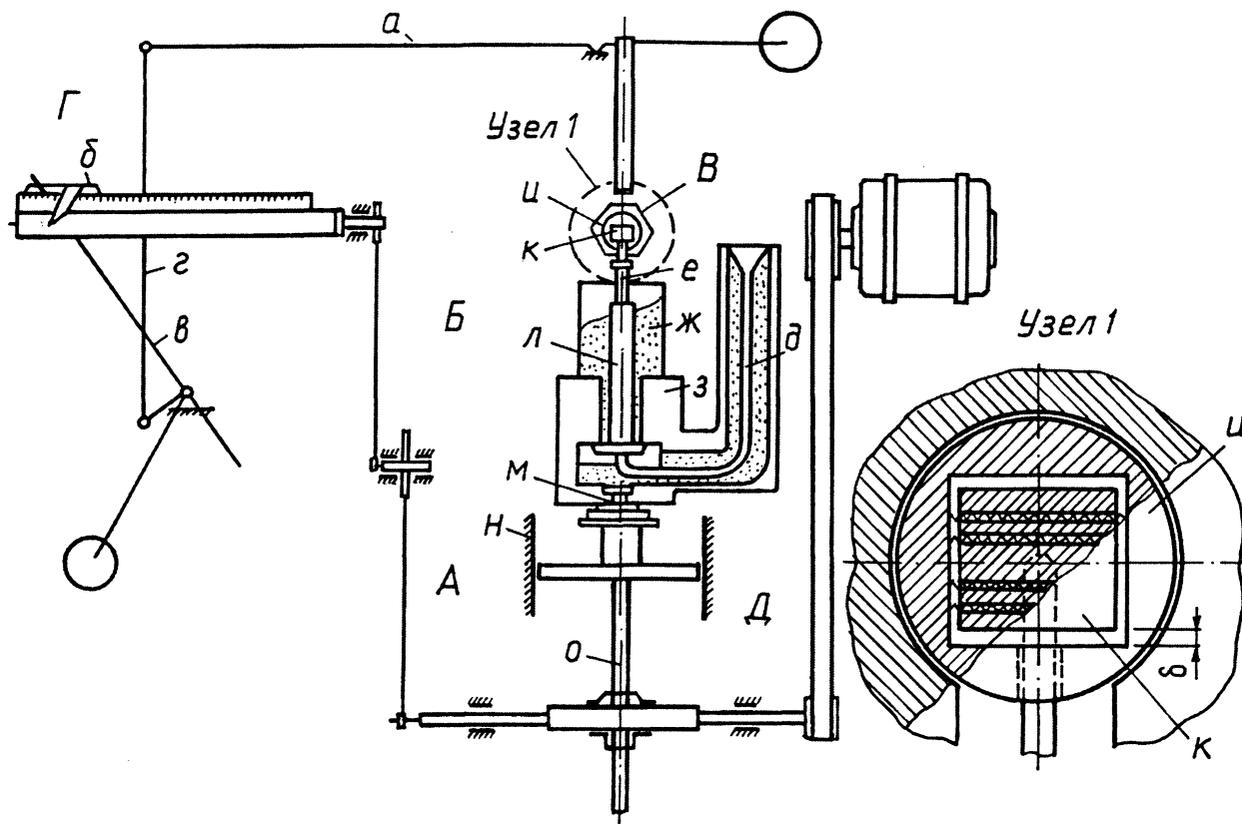


Рис. 2. Кинематическая схема установки для определения прочности и пластичности стали при температурах, близких к интервалу кристаллизации: А – механизм для перемещения формы; Б – форма; В – верхний захват с регулируемым зазором; Г – рычажно-маятниковое регистрирующее устройство; Д – станина; а – горизонтальный рычаг с противовесом; б – перо для записи диаграммы растяжения образца; в – стрелка, перемещающая каретку с пером; г – вертикальный рычаг с противовесом; д – литниковый ход; е – металлический стержень; з – металлический кожух; и – цилиндрическая опора; к – брус с пружинными распорками для подвески металлического стержня; л – литой образец; м – нижний захват; н – направляющие; о – грузовой винт

Испытания проводили на литых образцах диаметром от 20 до 40 мм при расчетной длине 190 мм при наличии массивного фланца на нижнем конце образца, который служит захватом и обеспечивает разрушение (разрыв) образца в намеченном месте напротив разъема формы. В верхней части системы расположено силоизмерительное устройство, обеспечивающее автоматическую запись диаграммы растяжения образца. Предел прочности рассчитывали по формуле:

$$\sigma_b = \frac{P}{F},$$

где P – показание регистрирующего устройства; F – площадь поперечного сечения затвердевшей корочки, определяемая путем непосредственного измерения.

Металл массой 12–13 кг выплавляли в кислой индукционной печи и заливали в течение 5–6 с в форму с перегревом в 60 °С сверх температуры ликвидуса. Полученные характеристики прочности и пластичности относили к средней температуре

между периферийной и внутренней частями затвердевшей корки (соответствующие величины принимали средними из трех опытов).

На рис. 3, 4 представлены некоторые результаты экспериментов, опубликованные в [4–6].

На рис. 3 показана зависимость предела прочности ряда марок стали от максимальной температуры (около 1450 °С), при которой разрыв затвердевшей корки становится наиболее вероятным. Изученные стали обладают следующими значениями предела прочности (в порядке убывания): сталь 30ХНМ – $\sigma_b = 0,6$ МПа; 28ХГСН – 0,4; 30ХНД – 0,3; 40ХС – 0,2; сталь Г13 – $\sigma_b = 0,1$ МПа.

На рис. 4 приведены дополнительные сведения относительно зависимости предела прочности ряда конструкционных марок стали по данным работы [4].

Следует отметить, что снижение температуры испытаний с 1450 до 1380–1400 °С приводит к монотонному приросту прочностных свойств, однако при дальнейшем уменьшении температуры

(ниже 1350 °С) указанный прирост резко увеличивается, так что σ_b достигают значений 9–10 МПа при температуре 1320 °С. По-видимому, температуру 1350 °С можно признать критической для образования горячих трещин. Рассмотрение изломов подтверждает наличие остаточной жидкой межкристаллической пленки в интервале температур 1350 – 1450 °С, что предопределяет наибольшую вероятность разрушения именно в этом температурном интервале.

Практика непрерывной разливки стали с большой степенью определенности указывает на то, что наибольшей склонностью к возникновению горячих трещин обладает сталь с содержанием 0,16 – 0,18% С, имеющая низкую пластичность. Очевидно, что возникновение горячих трещин в непрерывнолитых заготовках в большей степени определяется величиной пластических, чем прочностных, характеристик стали. Как следует из рис. 5, зависимость относительного удлинения от температуры отличается большим разбросом (по сравнению с прочностными характеристиками), однако область допустимых значений параметра δ с большой степенью определенности располагается в пределах 0,3 – 0,6%.

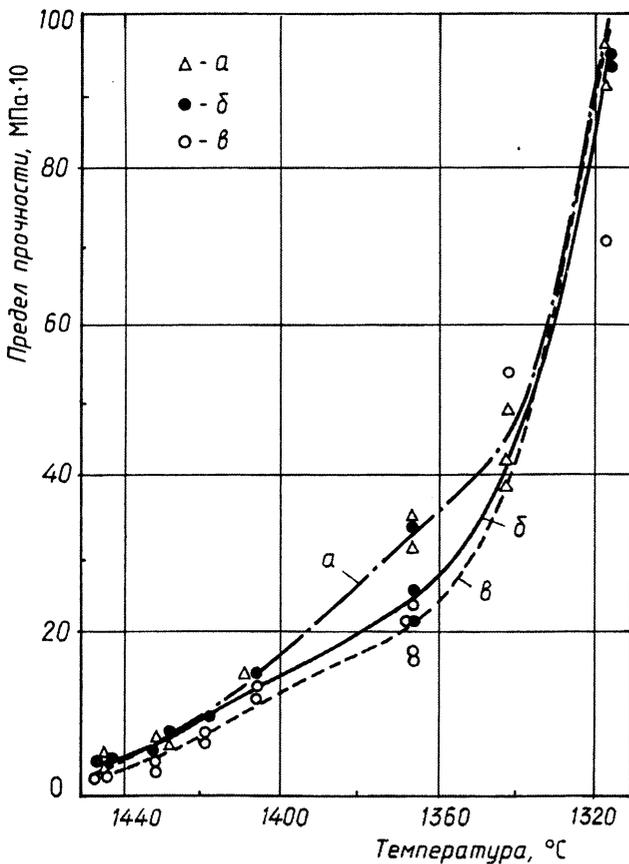


Рис. 3. Зависимость предела прочности ряда сталей от температуры: а – хромоникельмолибденовая; б – хромоникельмолибденомарганцовистая; в – хромоникельмолибденонемедистая

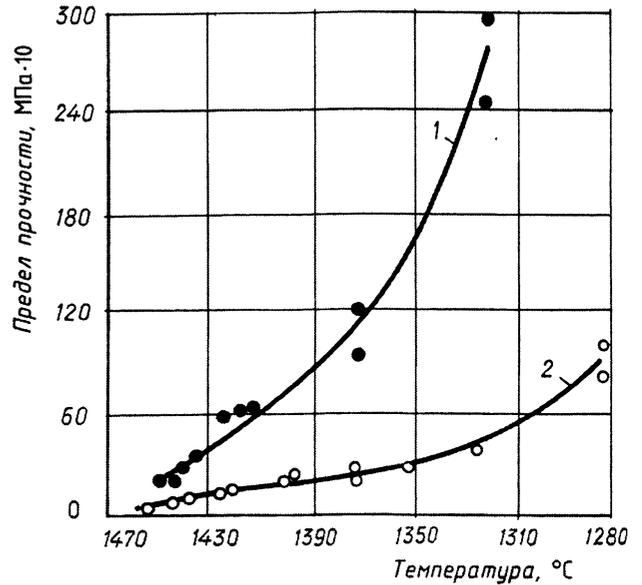


Рис. 4. Зависимость предела прочности сталей от температуры: 1 – кремнемарганцевомолибденовая, 2 – хромоникельвомолибденовая по данным [4]

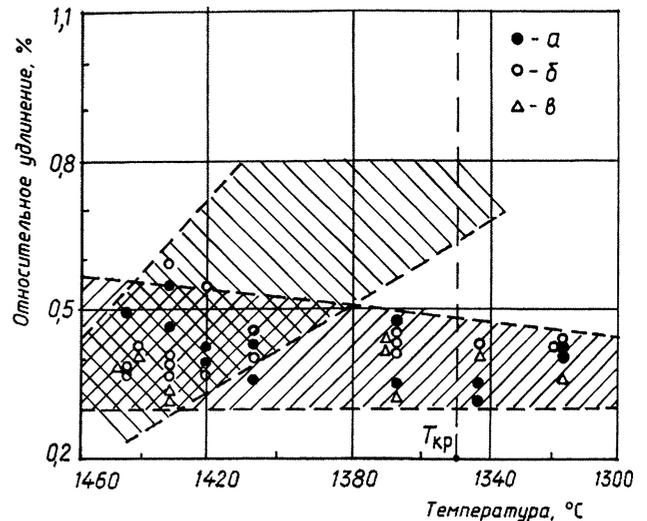


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения сталей от температуры: а – хромоникельмолибденовая; б – хромоникельмолибденомарганцовистая, в – хромоникельмолибденонемедистая; $T_{кр}$ – критическое значение температуры

Авторы [4–7] приходят к выводу о том, что легированные стали обладают пониженной прочностью и пластичностью по сравнению с углеродистой сталью и потому отличаются повышенной склонностью к образованию горячих трещин при непрерывном литье. Кроме того, неоднократно отмечается возможность снижения опасности возникновения горячих трещин при использовании комплексного легирования расплава редкоземельными элементами, а также применения всех возможных технологических мероприятий по снижению содержания серы и фосфора в исходном расплаве.

В последнее время исследования такого рода повторялись неоднократно [8–13] и приводили к

уже известному и достаточно узкому интервалу значений прочности и пластичности металла вблизи от температуры солидуса: $\sigma_s = 0,7 - 1,2$ МПа, $\delta = 0,3 - 0,7\%$.

В качестве примера на рис. 6 показаны значения предела прочности и пластичности стали 40X из работы В. И. Явойского и др. [9], посвященной влиянию редкоземельного элемента (ферроцерия) на склонность к образованию нитевидных трещин при непрерывном литье заготовок квадратного сечения (220x220 мм).

Следует отметить, что непосредственное измерение температур в непрерывнолитых заготовках, движущихся вдоль технологической оси МНЛЗ [14–16], показало, что в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ температура охлаждаемой поверхности заготовки снижается до уровня 600 – 700 °С. В связи с этим при анализе напряженного состояния оболочки затвердевающего слитка необходимо иметь представление относительно зависимости предела прочности стали от температуры в диапазоне 600 – 1450 °С. Данному вопросу посвящена обзорная работа И. Фребера [17], библиография которой насчитывает 44 источника, однако не содержит ссылок на пионерскую работу Г. Холла [1] и работы российских исследователей [2–10].

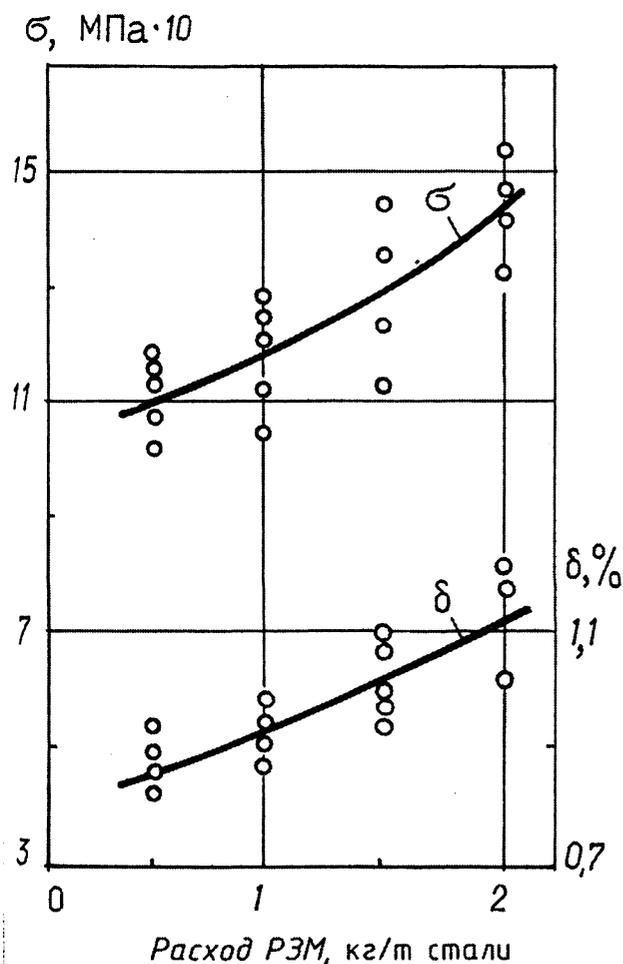


Рис. 6. Изменение пластичности и прочности стали 40X при температурах кристаллизации в зависимости от расхода РЭМ

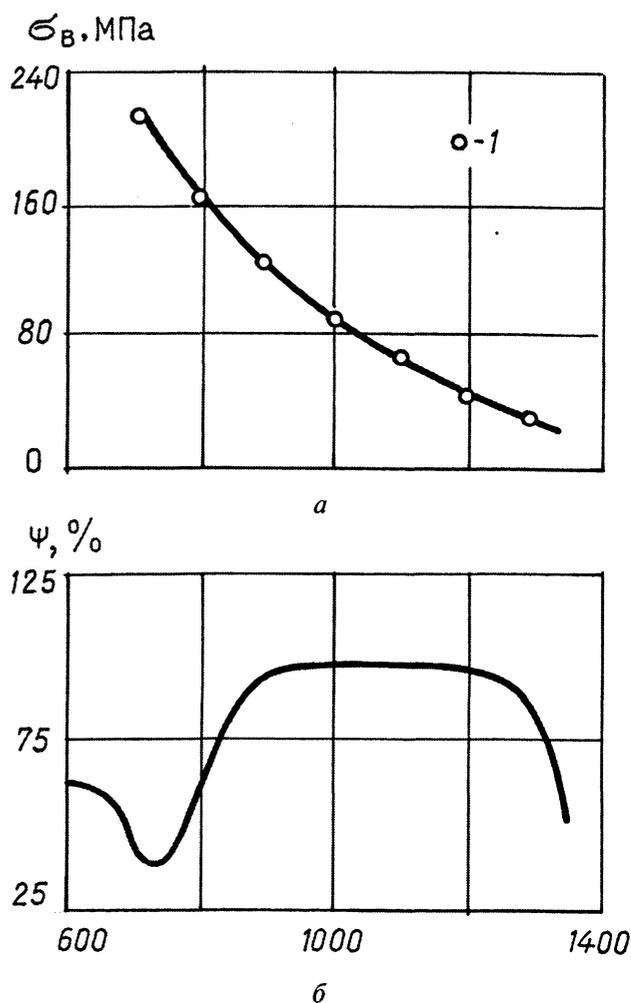


Рис. 7. Изменение предела прочности (а) и относительного сужения (б) в зависимости от температуры стали марки 10CrMo при скорости деформирования 0,7%/с ([18], рис. 1)

Представляет интерес мнение авторов [18] по поводу “провала” пластичности стали в области температур 700 – 800 °С. На рис. 7 приведены эмпирические данные относительно зависимости предела прочности и относительного сужения для жаропрочной хромомолибденовой стали марки 10CrMo от температуры [18]. Как и следует ожидать, по мере снижения температуры с 1300 до 700 °С значение прочности монотонно уменьшается.

Литература

1. Hall H. // Journal of Iron and Steel Institute (London), Spec. Rep. 1936. №.15, P. 65. “Прочность и пластичность литой стали в процессе охлаждения из жидкого состояния в песчаных формах”. Второй отчет Комитета исследований сталеного литья: Цитируется по Ю.А. Нехенди (5, стр. 749).
2. Лупырев И. И., Постников В. А., Коваленко П. Е. // А.с. 120946 СССР.
3. Постнов Л. М., Гуляев Б. Б. Исследование механических свойств стали в период затвердевания и анализ горячих трещин при непрерывной разливке // Непрерывная разливка стали. М.: Изд-во АН СССР. 1956. С. 212 – 221.
4. Гуглин Н. Н., Новикова А. А., Гуляев Б. Б. Исследование механических свойств стали при температурах, близких к точке кристаллизации // Кристаллизация ме-

таллов: Тр. 4-го совещ. по теории литейных процессов. М.: Изд-во АН СССР. 1960. С. 126–133.

5. Гуглин Н. Н., Гуляев Б. Б. Исследование факторов, определяющих образование горячих трещин в стальных слитках и отливках // *Сталь*. 1961. № 9. С. 830–836.

6. Гуглин Н. Н., Гуляев Б. Б. Исследование механического взаимодействия заготовки с кристаллизатором при непрерывной разливке стали // *Взаимодействие литейной формы и отливки*. М.: Изд-во АН СССР. 1962. С. 88–98.

7. Гуляев Б. Б. *Литейные процессы*. М.; Л.: Машгиз., 1960.

8. Прочность и пластичность стали 40X при температурах кристаллизации / В. И. Явойский, Ю. А. Складнов и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1972. № 3. С. 40–41.

9. Складнов Ю. А., Горохов Л. С., Явойский В. И. Причины образования угловых нитевидных трещин в непрерывных слитках квадратного сечения // *Непрерывная разливка стали*. 1974. № 2. С. 86–94.

10. Влияние малых добавок PЗМ на физико-технические свойства стали при температурах кристаллизации / В. И. Явойский, Л. С. Горохов и др. // *Проблемы стального слитка: Тр. 6-й конф. по слитку*. М.: Металлургия, 1976. С. 169–173.

11. Gray P. J. Plastic deformation of delta – ferritic iron at intermediate strain rates // *Metall. Transactions*. 1976. ser. A. Vol. 7, N 11. P. 1621–1627.

12. Gray P. J. Effect of carbon content on the plastic flow of plain carbon steels at elevated temperatures // *Metall. Transactions*. 1982. ser. A. Vol. 13. P. 125–134.

13. Deformation Behavior during Solidification of Steels / T. Nakagawa, T. Umeda, J. Murata, Y. Kamimura, N. Niwa // *ISIJ International*. 1995. Vol. 35, N 6. P. 723–729.

14. Температурные измерения в процессе непрерывной разливки стали / О. В. Мартынов, М. А. Криштал и др. // *Непрерывная разливка стали* / Под ред. О. В. Мартынова. М.: Металлургия, 1970. С. 59–79.

15. Самойлович Ю. А., Крулевецкий С. А., Горяинов В. А., Кабаков З. К. Тепловые процессы при непрерывном литье стали. М.: Металлургия, 1982.

16. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Филиппов В. В. *Стальной слиток. В 3 т. Т. 2. Затвердевание и охлаждение* / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2000.

17. Фребер И. Свойства оболочки формирующейся непрерывнолитой заготовки // *Черные металлы: Пер. с нем.* 1978. № 21. С. 28–34.

18. Флендер Р., Вюнненберг К. Образование внутренних трещин в непрерывнолитых заготовках // *Черные металлы. Пер. с нем.* 1982. № 23. С. 24–32.