



More modern ways of description of metal plasticity with purpose of appraisal of "plasticity resource", which can be used at choice of cooling regimes in the process of continuous casting of tube types of steel are examined.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси,
Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «Платан», Россия,
И. А. ТРУСОВА, БИТУ

УДК 669.187

ПЛАСТИЧНОСТЬ ТРУБНЫХ МАРК СТАЛИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В работе [1] приведены результаты анализа пластических свойств углеродистой и легированной стали в ходе кристаллизации и охлаждения слитков и заготовок, при этом основное внимание уделено традиционным способам описания пластических характеристик стали (относительное удлинение, относительное сужение). Отмечено, что существенное снижение пластических свойств стали наблюдается для двух интервалов температуры: непосредственно примыкающему к фронту кристаллизации (температурный интервал хрупкости) и интервала превращений аустенита (600–1170 °С).

Ниже рассмотрены более современные способы описания пластичности металла с целью оценки «ресурса пластичности», который может быть использован технологом при выборе режимов охлаждения в процессе непрерывного литья трубных марок сталей, обеспечивающих получение бездефектной структуры заготовок.

В отдельных случаях снижение пластических характеристик металла носит лавинный характер «катастрофического» обрыва. В качестве примера на рис. 1 приведены данные об изменении с температурой относительного удлинения и относительного сужения стали ШХ15 [2]. С технологической точки зрения наиболее нежелателен случай, когда такое резкое охрупчивание материала сочетается с наличием в стальной заготовке значительных внутренних напряжений.

Опасность подобного катастрофического обрыва пластических характеристик литой стали наглядно иллюстрируется экспериментом Залеского–Корнеева [3], который завершился разрушением крупного кузнечного слитка массой 38 т из стали 60ХН. Помимо прочих обстоятельств, послуживших причиной разрушения слитка (отсутствие отжига слитка после разливки, посад неотожденного слитка в вагон-термос с повышенной температурой), следует обратить внимание на

$\delta, \varphi, \%$ $\sigma, 0,1 \text{ МПа}$

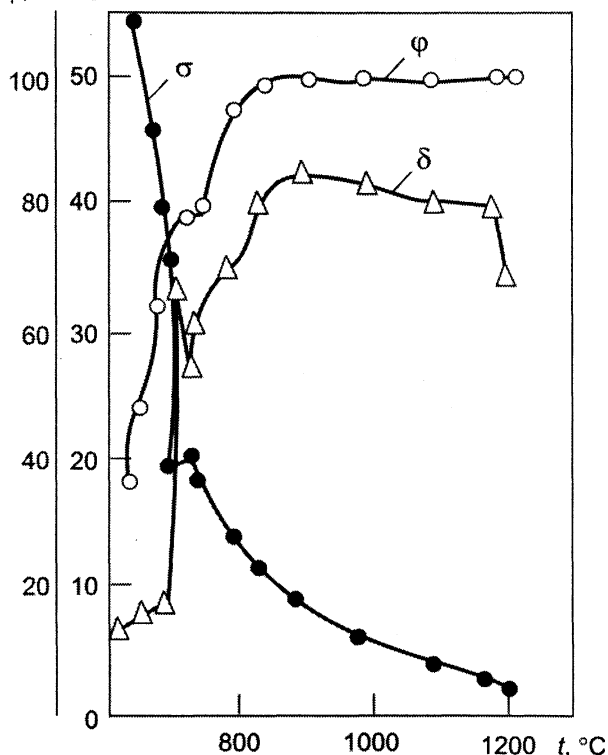


Рис. 1. Механические свойства стали ШХ15 при повышенных температурах: режим испытаний – нагрев до 1150 °С и охлаждение на воздухе до контрольной температуры

катастрофический обрыв показателя ψ (относительного сужения) и резкий спад относительного удлинения литой стали 60ХН в узком интервале температур от 740 до 700 °С.

При обсуждении примеров разрушения металлургических объектов (стальных слитков, заготовок) под воздействием термических напряжений представляется весьма важным отслеживание полной предыстории деформированного состояния объекта и оценки накопленной к моменту разрушения суммы повреждений металла, вызванными разнообразными причинами. В этом отноше-

нии следует положительно оценить принципиально новый подход к определению степени деформации, предложенный в работах В.Л. Колмогорова [4, 5]. В данном случае степень деформации некоторой частицы металла оценивается с учетом всей накопленной частицей материала деформации вдоль траектории движения

$$\varepsilon_n = \int_0^t \xi(\tau) d\tau.$$

Базовой характеристикой пластичности металла становится “степень деформации сдвига”, определяемая формулой:

$$\Lambda = \varepsilon_n \sqrt{3}. \quad (1)$$

Значение степени деформации сдвига, достигаемое к моменту разрушения металла, обозначается термином Λ_p , а отношение $\Psi = \frac{\Lambda}{\Lambda_p}$ называется

степенью использования запаса пластичности металла, или, короче, “ресурсом пластичности металла”.

Степень деформации сдвига связана с привычной характеристикой пластичности – относительным сужением металла простым соотношением

$$\Lambda = \sqrt{3} \ln \frac{100}{100 - \psi}. \quad (2)$$

Следует отметить весьма обширную библиографию по вопросам пластичности сталей различного состава и разного назначения [4–11], однако в большинстве случаев сведения о пластичности сплавов относятся к деформированному состоянию сплавов в интервале температур горячей обработки материалов.

Между тем для изучения условий нарушения сплошности материала слитков и непрерывнолитых заготовок требуются данные о пластичности металла в литом состоянии, а также при некото-

рых специфических температурах (в непосредственной близости к температуре солидуса либо в области температур фазовых превращений, сопровождающихся изменением удельного объема металла).

В ряде справочных пособий имеется информация, относящаяся к стали в литом состоянии, которая может оказаться полезной при последующем анализе термонапряженного состояния непрерывнолитых стальных заготовок и генезисе разнообразных проявлений нарушения сплошности металла. Ниже приводятся примеры подобной информации, характеризующей ресурс пластичности трубных марок стали, однако во всех случаях полученной на образцах в литом состоянии.

Малолегированная трубная сталь. Низколегированная сталь трубного состава разливается в слябовые заготовки на МНЛЗ криволинейного типа Нижнетагильского металлургического комбината. В [5] даны результаты специального исследования показателей пластичности стали, химический состав которой приведен в табл. 1, на основе образцов, полученных из различных участков полностью остывших стальных слябов. При этом результаты обработки показателей пластичности стали выполняли в соответствии с новой концепцией трактовки ресурса пластичности, предложенной в [4, 5].

На рис. 2, 3 показана температурная зависимость пластичности стали заготовок непрерывной разливки, полученных на МНЛЗ криволинейного типа Нижнетагильского металлургического комбината [5]. В ходе исследований рассмотрены показатели пластичности четырех плавок стали, отличающихся расходом алюминия на раскисление стали, а также скоростью вытягивания слитка.

В табл. 1 приведены химический состав изученной стали (содержание элементов в процентах), а также показатели расхода литья и скорости алюминия на раскисление.

Таблица 1. Химический состав стали

Номер плавки	C	Mn	Si	P	S	Скорость разливки, м/мин	Al(г/т)
1	0,17	0,45	0,17	0,016	0,020	0,5	700
2	0,11	0,73	0,22	0,24	0,020	0,5	1000
3	0,16	0,45	0,23	0,014	0,023	0,5	400
4	0,16	0,45	0,23	0,014	0,023	0,75	400

Из рис. 2, 3 видно, что наиболее низкой пластичностью обладают средние слои сляба, а наиболее высокой пластичностью – слои, прилегающие к большому радиусу сляба.

Авторы [5] объясняют различие пластичности периферийных и срединных слоев сляба различиями в макроструктуре; при этом пониженная пластичность металла по малому радиусу объясняется избытком неметаллических включений и прочих загрязнений, всплывающих в незатверде-

шей части сляба и затем примыкающими к его малому радиусу. Из рис. 3 можно предположить, что наименьшей пластичностью обладает сталь, раскисленная алюминием в количестве 700 г/т. Несколько выше пластичность металла из сляба, полученного с более высокой скоростью вытягивания (0,75 м/мин).

Из рис. 2, 3 следует наличие минимума пластичности в интервале температур 850–950 °С, что совпадает с представлением, связывающем

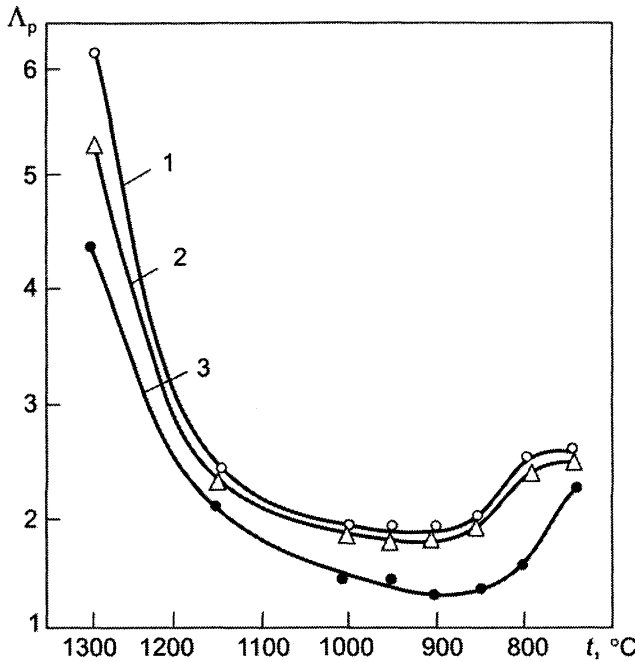


Рис. 2. Температурная зависимость пластичности стали непрерывнолитых слэбов: 1 – поверхностные слои у большого радиуса слэба; 2 – то же, для поверхности слэба по малому радиусу; 3 – для металла из середины слэба

пониженную пластичность со структурными превращениями в аустените (выделением карбидов и карбонитридов в указанном интервале температур). Этот результат представляется важным для практики непрерывного литья, поскольку сопряжен с опасностью разрушения металла в зоне его высокой хрупкости.

Выполненный нами численный анализ термонапряженного состояния стальных заготовок, материал которых подвержен структурным превращениям аустенита в интервале температур 1170–750 °С, показал наличие “вспышек” опасных растягивающих напряжений на тех участках непрерывнолитых заготовок, где происходит охрупчивание материала вследствие локального падения пластических свойств стали.

Таблица 2. Пластичность стали ШХ15 по данным [7]

$t_{и}, °C$	Λ_p при $t_{и}, °C$							
	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
1150	1,40	1,58	1,82	2,00	2,30	2,45	2,18	–
1200	1,50	1,70	2,00	2,30	2,50	2,70	2,72	1,50
1250	1,38	1,66	1,95	2,24	2,40	2,65	2,70	2,40
1275	1,36	1,60	1,90	2,15	2,36	2,60	2,80	2,50

Примечание: 1. При $t_{и}$, равных 1200 и 1250 °С, и $t_{и}$, равных 1250 и 1275 °С, $\Lambda_p = 0,60$. 2. Каждый результат, приведенный в таблице, является средним по трем испытаниям. 3. Точность оценки выборочного среднего значения пластичности составляет $\pm 0,15$. 4. Пластичность определяли прокаткой на клин крестообразных образцов при $(\sigma/T)_{ср} = +0,70$; $H_{ср} \approx 35 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 4, а–в приведена зависимость ресурса пластичности Λ_p от температуры литой хромистой стали 9ХС при трех вариантах химического состава.

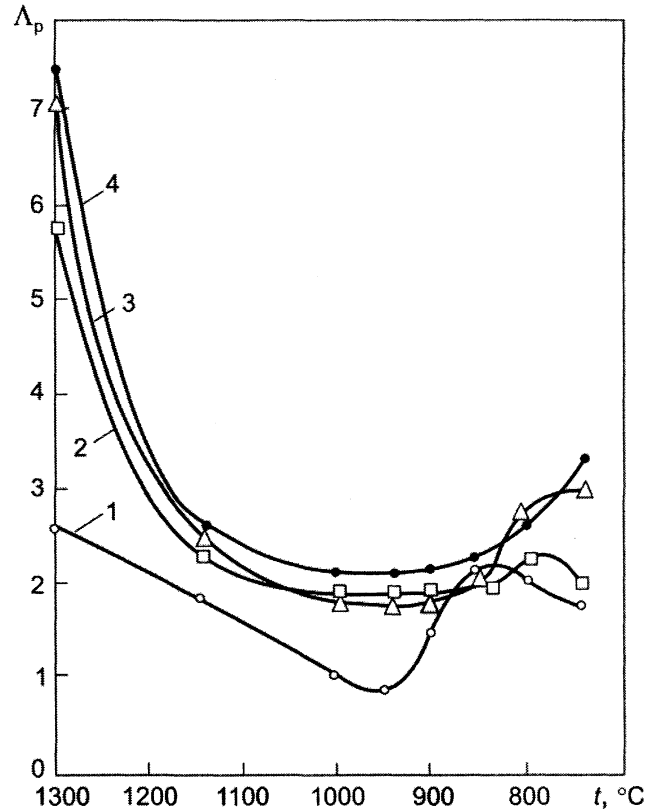


Рис. 3. Температурная зависимость пластичности стали, разлитой в соответствии с режимами, указанными в табл. 1

Легированная высокоуглеродистая сталь ШХ15. Базовый химический состав стали ШХ15 следующий: 0,95–1,05% С; 0,20–0,40% Мn; 0,17–0,37% Si; 1,3–1,65% Cr; 0,25% Cu; 0,30% Ni; 0,02% S; 0,027% P.

Температурный режим горячей прокатки стали ШХ15 составляет 1180–1200 °С (табл. 2 по данным [7, стр. 34]).

В дополнение к данным табл. 2 авторы [7] отмечают, что ресурс пластичности стали ШХ15 при температурах испытания 1250 и 1275 °С составляет $\Lambda_p = 0,6$.

Данные по ресурсу пластичности отличаются значениями температуры, до которой осуществлялся предварительный нагрев перед началом испытаний.

Содержание компонента, %	C	Cr	Mn	Si	S	P
(а)	0,87	3,63	1,60	1,56	0,011	0,023
(б)	0,86	2,02	1,40	1,35	0,010	0,024
(в)	0,92	1,94	1,32	1,37	0,011	0,020

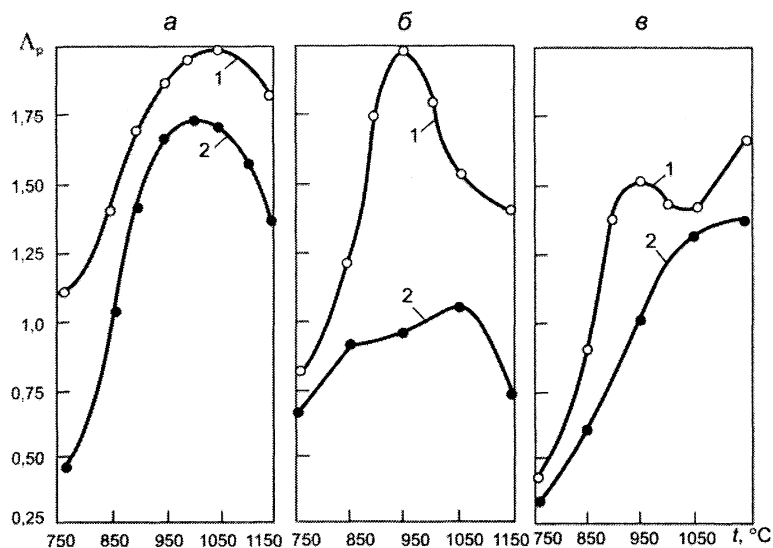


Рис. 4. Зависимость ресурса пластичности от температуры литой хромистой стали марки 9XC для трех вариантов химического состава: 1 – до 1200 °C; 2 – до 1250 °C

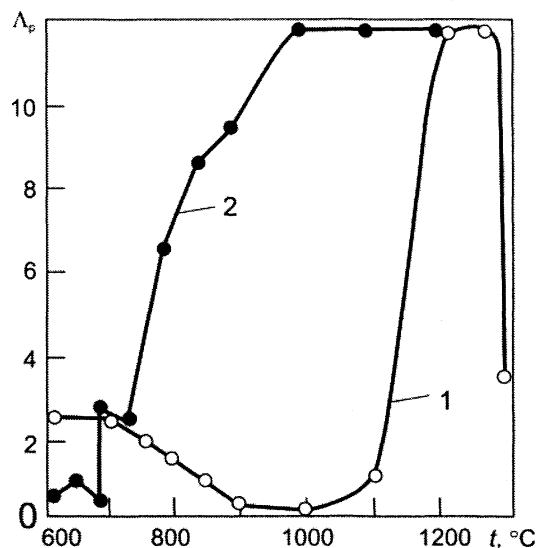


Рис. 5. Сопоставление зависимости ресурса пластичности Λ_p от температуры для двух марок стали: 1 – сталь 9XC; 2 – сталь ШХ15

Сталь марки 9XC отличается по базовому составу от стали ШХ15 повышенным содержанием хрома, что достаточно существенно сказывается на пластических свойствах стали. Для сравнения на рис. 5 представлена зависимость параметра для стали 9XC (кривая 1) и стали ШХ15 (кривая 2), полученная на образцах, подвергнутых предварительной деформации (прокатке). На рис. 6 показано влияние предварительного нагрева образца стали ШХ15 до 1250 °C (кривая 2) по сравнению со случаем прямого нагрева образца (кривая 1) до контрольной температуры испытаний.

Заключение

Подводя итоги краткого рассмотрения сведений о пластических характеристиках трубных марок стали, можно признать существенным установление определенной взаимосвязи между “катастрофическим” падением характеристик пластичности и вероятностью разрушения стальных слитков под воздействием внутренних термических напряжений. Вместе с тем возможности использования сведений относительно ресурса пластичности стали при анализе термонапряженного состояния непрерывнолитых заготовок требуют дополнительных исследований. Предварительно можно отметить, что предложенная в новой концепции функция Δ (степень деформации сдвига), определяемая соотношениями (1) и (2), естественным образом стыкуется в аналитической форме с функциональными показателями пластичности и ползучести (модуль вязкости, время

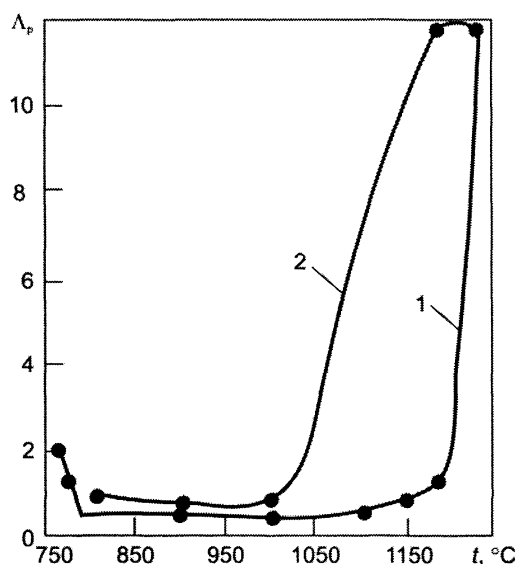


Рис. 6. Зависимость ресурса пластичности Λ_p от температуры для двух образцов деформированной стали ШХ15: 1 – при прямом нагреве до температуры испытания образца; 2 – при остывании образца от температуры 1250 °C, достигнутой в ходе предварительного нагрева

релаксации металла и др.), что позволяет устранить существующий отрыв привычных показателей пластичности (относительное удлинение, относительное сужение) от системы уравнений пластичности и ползучести, с помощью которых в настоящее время осуществляется численная оценка деформаций и напряжений, возникающих в стальных слитках и непрерывнолитых заготовках.

Литература

1. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Мандель Н.Л. Показатели пластичности углеродистой и легированной стали при повышенных температурах (обзор) // *Литье и металлургия*. 2006. №2. Ч.2. С. 93–96.
2. Гуляев А.П. и др. Инструментальные стали: Справ. М.: Машиностроение, 1975.
3. Залесский В.И., Корнеев Д.М. и др. Распределение температуры по сечению слитка в процессе охлаждения в изложнице в вагоне-термосе // *Кузнечно-штамповое производство*. 1966. №8. С. 9–11.
4. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. М.: Металлургия, 1970.
5. Пластичность и разрушение / Под науч. ред. В.Л. Колмогорова. М.: Металлургия, 1977.
6. Дзугутов М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1977.
7. Мигачев Б.А., Потапов А.И. Пластичность инструментальных сталей и сплавов: Справ. М.: Металлургия, 1980.
8. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1972.
9. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975.
10. Механические свойства сталей, деформированных в широком диапазоне температур / В.П. Северденко Э.Ш. Суходрев, А.Р. Орлов и др. Мн.: Наука и техника, 1974.
11. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1976.