



Анализ физических моделей процесса разгиба слитка в криволинейных МНЛЗ

Рассмотрены вопросы деформации слитка с жидкой сердцевиной в технологической линии криволинейной МНЛЗ. Использована классификация физических моделей процесса выпрямления слитка на МНЛЗ с разделением их на точечные и послойные. Особое внимание уделяется анализу известных в литературе противоречивых результатов по влиянию различных технологических факторов на параметры, определяющие область существования технологии деформации непрерывнолитого слитка в двухфазном состоянии. Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: МНЛЗ, деформация, разгиб, слиток, заготовка

The questions of deformation of strand with a liquid core in the technological line of curvilinear CCM are considered. Classification of physical models of process of straightening of strand on CCM with a division them on a point and layer is used.

Keywords: CCM, deformation, straightening, strand, bar

Введение

В последние десятилетия одной из наиболее быстро развивающихся ветвей металлургической науки является непрерывная разливка стали. Актуальным является создание компактных и высокопроизводительных МНЛЗ.

Наиболее значимой тенденцией последних десятилетий в области непрерывной разливки стальных заготовок является использование криволинейных МНЛЗ, где деформация непрерывнолитого слитка перенесена из области полного его затвердевания в зону двухфазного (твёрдо-жидкого) состояния. Определяющим фактором, при этом, является режим разгиба непрерывнолитого слитка.

Накопленные к настоящему времени знания о деформации разгиба слитка нуждаются в углубленном их изучении. Целью работы является критический анализ имеющихся разработок в данной области, что может быть основой для совершенствования физической модели процесса.

Объект исследования

Конфигурация технологической оси сортовой МНЛЗ в наиболее сложном варианте включает в себя 5 участков: прямолинейный кристаллизатор, участок загиба в зоне, прилегающей к выходу заготовки из кристаллизатора, радиальный участок с постоянной кривизной криволинейный участок, где слиток подвергается разгибу вплоть до перехода на финишный прямолинейный участок (рис. 1).

Для единообразной идентификации физических моделей процесса загиба (разгиба) непрерывнолитого слитка (заготовки) обратимся к понятиям напряженно-деформированного состояния (НДС), используемым в механике сплошных сред.

При переходе от радиального участка техно-

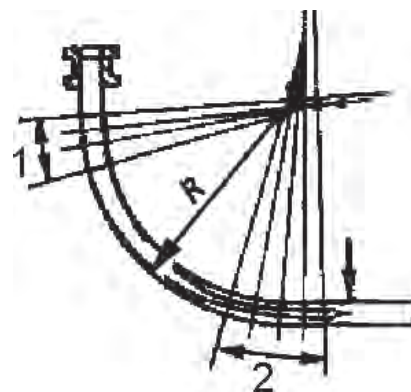


Рис. 1. Зоны пластической деформации на технологической оси криволинейных МНЛЗ: R – базовый радиус; 1 – загиб; 2 – разгиб

гической линии МНЛЗ к криволинейному и далее к прямолинейному участку слитков (заготовка) подвергается пластической деформации. Напряженное состояние слитка при этом может быть охарактеризовано как линейное, а вектор главного напряжения в любой точке его поперечного сечения направлен параллельно нейтральной линии слитка. Тело слитка от нейтральной линии до поверхности с большей кривизной в соответствии с гипотезой плоских сечений подвергается деформации растяжения, а другая часть слитка (от нейтральной линии до поверхности с меньшей кривизной) – деформации сжатия. Величина деформации в обоих случаях возрастает от нейтральной линии к поверхности пропорционально расстоянию от нейтральной линии (рис. 2).

В случае загиба (разгиба) слитка с жидкой сердцевиной анализ деформированного и напряженного состояния имеет смысл только в закристаллизовавшейся корочке металла. При этом минимальные значения напряжений и деформаций имеют место в зоне

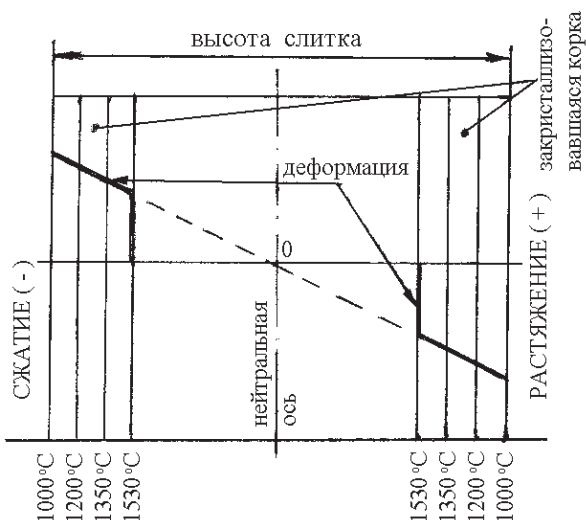


Рис. 2. Распределение деформации по сечению слитка с жидкой сердцевиной при разгибе

перехода от жидкой к твердой фазе, а максимальные на поверхности слитка.

Технологическая пластичность стали в зонах растяжения и сжатия неравноценны. Практика свидетельствует, что из-за структурных особенностей двухфазной жидко-твердой зоны предельно допустимые параметры деформации при растяжении ниже, чем при сжатии. Поэтому при загибе или разгибе слитка необходимо и достаточно достичь благоприятных соотношений напряжений и деформаций только в зоне действия растягивающих напряжений.

Еще одно проявление анизотропности технологической пластичности сталей заключается в том, что в определенных температурных интервалах пластичность резко, иногда на порядок и больше, снижается, что может повлечь за собой различного рода дефекты (рис. 3 [13]). Для непрерывной разливки стали значимым является высокотемпературный интервал хрупкости (ТИХ).

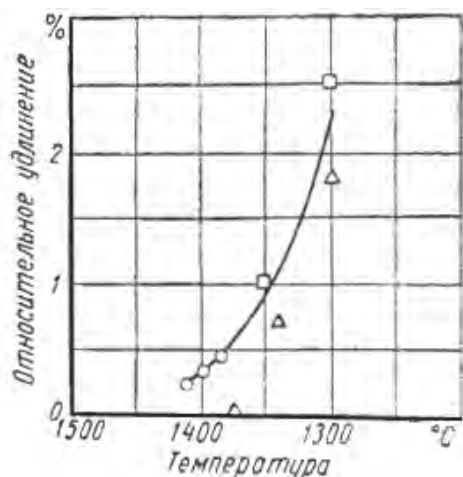


Рис. 3. Зависимость предельной степени деформации стали от температуры

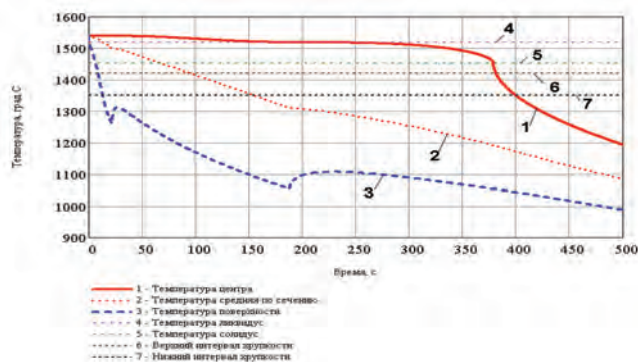
Границы этого интервала у разных авторов отличаются, но у большинства из них укладываются в 1350-1420 °С.

Это обстоятельство с одной стороны усложняет физическую модель, но, с другой стороны, позволяет

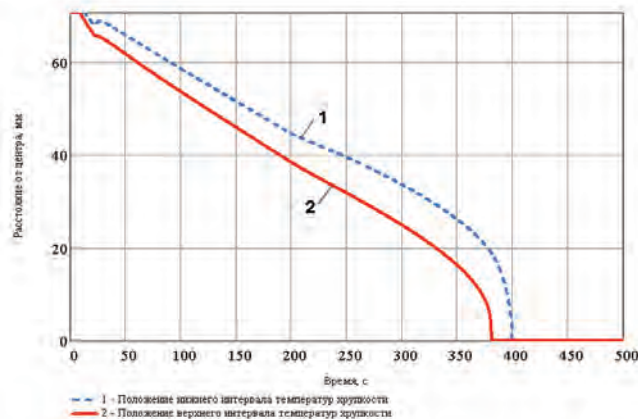
сузить границы модели до зоны температурного интервала хрупкости.

Зачастую при построении физической и математической модели процессов загиба и разгиба возникают системные ошибки в связи с выпадением из поля зрения исследователей некоторых положений механики сплошных сред. Ниже анализируются некоторые из этих системных ошибок.

Поскольку в процессе перемещения по технологической линии слиток остывает, то соответственно изотермы верхней и нижней границ ТИХ перемещаются от поверхности слитка к его нейтральной линии (рис. 4б). Данные кривые на рис. 4 получены при расчете численным методом теплообмена в процессе разливки слитка диаметром 140 мм при скорости разливки 2,2 м/мин.



а) изменение температуры по сечению слитка во времени: 1 – температура центра; 2 – среднemasовая температура; 3 – температура поверхности; 4 – температура ликвидус; 5 – температура солидус; 6 – верхний предел ТИХ; 7 – нижний предел ТИХ



б) перемещение изотерм ТИХ по сечению слитка во времени: 1 - положение нижнего ТИХ; 2 - положение верхнего ТИХ

Рис. 4. Процесс охлаждения слитка (а) и соответствующее ему перемещение изотерм температурного интервала хрупкости по сечению слитка (б) во времени

Несовпадение траектории перемещения материальных частиц слитка по технологической оси МНЛЗ с траекторией границ ТИХ приводит к усложнению физической модели и математического описания рационального процесса загиба (разгиба).

В работах [1, 2] подчеркивается, что при расчете степени использования ресурса пластичности каждой материальной частицы необходимо учитывать историю ее деформирования. При этом подсчет накопленной деформации осуществляется суммированием

ем ее вдоль траектории движения частицы материала за определенный отрезок времени.

В некоторых случаях, приведенных ниже, слой ТИХ представлен линией, которая пересекает под определенным углом траекторию движения материальных частиц слитка в процессе его разгиба. В этом случае, если следовать фундаментальному принципу подсчета накопленной деформации, то весь путь материальных частиц, где легитимно суммирование деформации, сводится к точке пересечения траектории движения частицы с линией ТИХ. Более подробно это обстоятельство будет рассмотрено далее на конкретных примерах.

При конструировании физической модели необходимо также учитывать свойства показателей напряженно-деформированного состояния, которые ограничивают область существования данной технологии или вводятся в математические модели технологических процессов.

В качестве примера рассмотрим область возможного применения такого широко используемого показателя деформированного состояния, как относительная деформация тела. В механике сплошных сред для количественной оценки деформации используются несколько показателей [2]:

– показатель Коши ε :

$$\varepsilon = \Delta L / L_0,$$

где $\Delta L = L_1 - L_0$ – изменение размера тела в результате деформации; L_0 и L_1 – начальный и конечный размер деформируемого тела;

– показатель Генки e :

$$e = \ln(L_1 / L_0).$$

Показатель Коши достаточно универсален, но имеет два существенных недостатка: неточно отражает физический смысл больших деформаций и не обладает свойством аддитивности*

Далее при анализе физических моделей, разработанных различными авторами, мы покажем, насколько существенно это свойство показателя Коши и как оно влияет на легитимность математических операций при решении задачи построения оптимальных режимов выпрямления непрерывнолитого слитка в линии МНЛЗ.

Краткий анализ физических моделей процесса выпрямления слитка на МНЛЗ

Все решения по поиску оптимального режима деформации непрерывнолитого слитка на участках загиба и разгиба (увеличение или уменьшение кривизны слитка) могут быть сгруппированы по главным объектам исследования:

- деформация в точке или на локальном отрезке;
- деформация в слое.

Для первой группы характерно рассмотрение поведения физической модели в некоторых точках или локальных отрезках траектории перемещения материальных частиц слитка, находящихся на его поверх-

ности или в теле слитка.

Вторая группа включает в себя физические модели, где центральным объектом исследования является слой или линия, в которых, или вдоль которых, материальные частицы обладают критическими свойствами или находятся в зоне критических величин напряжений и деформаций.

Точечные модели

В качестве примера анализа физической и математической моделей первой группы рассмотрим модель предлагаемую в работах [3, 4].

В работе [3] подчеркивается исключительная важность обоснованного выбора физической модели загиба-выпрямления непрерывнолитого слитка для построения современной высокоэффективной МНЛЗ. К ключевым характеристикам этой физической модели авторы относят:

- характер деформации закристаллизовавшейся оболочки непрерывнолитого слитка на участках загиба (разгиба);
- теплофизические параметры непрерывнолитого слитка в процессе его перемещения по технологической траектории;
- деформационные параметры процесса, ограничивающие область существования данной технологии.

Вместе с тем, при формировании физической модели процессов загиба (разгиба) непрерывнолитого слитка авторы пошли на серьезные упрощения реального процесса.

Несмотря на то, что в постановочной части работы авторы утверждают, что в физической модели процесса разгиба наиболее неблагоприятные для сплошности слитка процессы идут на некоторой глубине от его поверхности, где температура металла 1300-1450 °С, все математические выкладки по физической модели относятся только к поверхностным слоям.

При построении физической модели авторы различают такие виды относительной деформации:*

$\varepsilon_{дон}$ – критическое значение показателя пластичности стали;

$\varepsilon_{раз\Sigma}$ – накопившаяся полная относительная деформация на всем участке разгиба;

$\varepsilon_{раз,i}$ – относительная деформация разгиба на каждом из роликов разгиба;

$\Sigma \varepsilon_{раз,i}$ – суммарная относительная деформация разгиба, накопившаяся к моменту достижения рассматриваемым сечением слитка i -го ролика разгиба.

Все показатели взаимосвязаны такими соотношениями:

$$\varepsilon_{раз,i} = \frac{\varepsilon_{раз\Sigma}}{n}, \quad (1)$$

где n – общее число точек разгиба;

$$\varepsilon_{раз\Sigma} = \frac{x_0}{R_0 - x_0}, \quad (2)$$

где x_0 – толщина слитка; $(R_0 - x_0)$ – радиус по-

* Аддитивность – свойство физических, геометрических и других величин, состоящее в том, что значение величины, соответствующее целому объекту, равно сумме значений величин, соответствующих его частям при любом разделении его на части

* В терминах и интерпретации авторов

верхности слитка максимальной кривизны;

$$\sum \varepsilon_{раз} = i \cdot \varepsilon_{раз,i}, \quad (3)$$

где i – порядковый номер ролика в зоне разгиба;

$$\varepsilon_{раз\Sigma} = \sum \varepsilon_{раз,i} = n \cdot \varepsilon_{раз,n}. \quad (4)$$

Общее число точек разгиба определяется так

$$n = \frac{\varepsilon_{раз\Sigma}}{\varepsilon_{доп}} + 1. \quad (5)$$

Для выявления особенностей рассматриваемой физической модели преобразуем выражение (5)

$$\varepsilon_{раз\Sigma} = \varepsilon_{доп} \cdot (n - 1). \quad (6)$$

Из (6) следует, что накопившаяся полная относительная деформация на всем участке разгиба в $(n-1)$ раз превышает критическое значение показателя пластичности стали. Следовательно, уравнение (6) не соответствует исходным ограничениям для физической модели процесса, а именно, «... не превышение величины относительной деформации ... на каждом из роликов ... критических значений показателя пластичности стали $[\varepsilon]$ ». Отсюда также следует, что чем больше точек разгиба (количество роликов), тем в большее количество раз относительная деформация слитка на участке разгиба может превышать ее критическое значение для материала слитка, при той же кривизне траектории материальных частиц в зоне разгиба.

Понятно, что такая физическая модель не обеспечивает рациональный режим пластической деформации на участке разгиба слитка на МНЛЗ, который в принятых обозначениях [3] может быть записан так

$$\varepsilon_{раз\Sigma} \leq \varepsilon_{доп}. \quad (7)$$

В разделе «объект исследования» мы обращали внимание исследователей на особенности показателя относительной деформации в интерпретации Коши.

Поскольку показатель Коши не обладает свойством аддитивности, то запись, связывающая все показатели относительной деформации в виде

$$\varepsilon_{раз\Sigma} = \sum \varepsilon_{раз,i} = n \cdot \varepsilon_{раз,n},$$

является некорректной.

Отметим одну общую для всех «точечных» и «смешанных» («послойно-точечных») физических моделей особенность. По разным соображениям расчетные схемы для определения траектории движения слитка на криволинейном участке привязывают к положению роликов поддерживающего рольганга. Такой подход придает роликам некую функциональность и создает иллюзию, что, например, изменяя расстояние между роликами при неизменной траектории движения можно повлиять на параметры деформации слитка. В некоторых случаях такой подход приводит к системным ошибкам. Реально же роль роликов вторична, так как величина и интенсивность изменения кривизны траектории движения слитка продиктованы свойствами металла слитка, тепловыми процессами, происходящими в слитке и т.д.

Послойные модели

Одной из первых работ, где были сформулированы принципы построения физической модели с послойным анализом деформированного состояния

слитка на стадии его выпрямления, является работа М.Я. Бровмана и др. [5]. В ней рекомендовано различать два слоя:

первый – где кристаллизация к моменту начала разгиба завершилась;

второй – где кристаллизация происходит одновременно с процессом разгиба слитка.

Критерием, ограничивающим область существования технологии разгиба слитка в двухфазном состоянии, принята допустимая относительная деформация $[\varepsilon]$.

Детально проанализированы предельные режимы деформации, когда слиток выпрямляется мгновенно в плоскости, где завершается процесс кристаллизации, а также для слоев, закристаллизовавшихся до начала выпрямления.

Вместе с тем, авторы признают, что при наличном на тот момент уровне знаний «...для слоев металла, затвердевших в самом процессе изгиба, оптимальный режим нельзя найти для отдельно взятого слоя».

Весомым шагом вперед является работа [6]. Здесь главным объектом физической модели является зона температурного интервала хрупкости (ТИХ). Главная функция физической модели сформулирована так: «...необходимо, чтобы при разгибе заготовки (слитка) в двухфазном состоянии величина относительной деформации внутренних слоев, находящихся в температурном интервале хрупкости, была меньше допустимой для стали данной марки».

Приведенный в работе [6] пример расчета профиля кривой выпрямления слитка позволяет проанализировать особенности предлагаемой физической модели.

Прежде всего, обращает на себя внимание, что положение температурного интервала хрупкости (ТИХ) в теле слитка на протяжении всего процесса его выпрямления остается неизменным, т.е. на некоем фиксированном расстоянии между поверхностью малого радиуса и нейтральной линией. Это, безусловно, является определенным допущением, поскольку в ходе процесса выпрямления слиток остывает, и положение слоя ТИХ изменяется – слой перемещается от приповерхностных слоев к нейтральной линии слитка (рис. 4б).

Другой особенностью этой физической модели является то, что ТИХ не имеет толщины, что также может быть принято как допущение.

Одна из частей публикации посвящена выбору принципа построения технологической линии МНЛЗ на криволинейном участке. Рекомендуются «...выпрямление слитка выполнять по кривой, характерной особенностью которой должна быть минимально допустимая деформация слоев металла в каждой точке». Одновременно в том же тексте рекомендуется уравнение для расчета кривизны слитка, которое обеспечивает постоянные деформацию и ее скорость в каждой точке разгиба.

Как корреспондируются вышеприведенные требования трудно проследить. Действительно, является ли минимально допустимая деформация одно-

временно и постоянной по величине в каждой точке, также как и скорость деформации на всем участке выпрямления слитка, сказать сложно. К тому же, при выборе оптимального режима выпрямления слитка, по-видимому, следует выбирать не «минимально допустимую величину деформации», а максимально возможную при условии не превышения ею величины допустимой деформации для заданных условий деформирования.

Несколько иной подход к формированию физической модели «послойного» типа использован в работах [7, 8]. Исходная позиция предлагаемой физической модели такова: «...вероятность появления дефектов в процессе правки значительно большая не на поверхности (слитка), а на фронте кристаллизации оболочки, где высокая температура определяет низкие прочностные свойства материала». Как следствие отмеченного следует, что «...сопряжение дугового и горизонтального участков технологической линии МНЛЗ целесообразно осуществлять по кривой, обеспечивающей постоянство скорости деформации по длине на границе твердой и жидкой фаз кристаллизующейся заготовки». Аналитическая запись условия «...равенства деформации по фронту кристаллизации на равных участках пути...» в интерпретации авторов такова:

$$\frac{h_i}{2 \cdot R \cdot S} = const, \quad (8)$$

$$\text{где } h_i = h_n \cdot \left[(1-m) \cdot \frac{S}{L_2} + m \right]; \quad m = \frac{h_k}{h_n},$$

где h_n – толщина жидкой фазы слитка в начале криволинейного участка; h_k – толщина жидкой фазы слитка в конце криволинейного участка; h_i – толщина жидкой фазы в i -й плоскости (слое); R – радиус кривизны; S – расстояние от точки сопряжения криволинейной и прямолинейной части траектории до заданной точки; L_2 – длина криволинейной части траектории.

Базовым уравнением для (8) является уравнение для определения относительной деформации ε при полном выпрямлении слитка с исходным радиусом кривизны R

$$\varepsilon = \frac{h}{2 \cdot R}, \quad (9)$$

где h – толщина слитка или высота исследуемого слоя.

Параметр « h » на протяжении всего процесса выпрямления есть величина постоянная. Именно это обстоятельство позволяет учесть историю деформирования исследуемой материальной частицы и рассчитать величину накопленной, а не мгновенной ее деформации.

Если же параметр « h » является величиной переменной во времени, как предлагают авторы этой физической модели, то это означает, что в каждое следующее мгновение мы имеем дело уже с другой частицей, у которой другая история деформирования, а следовательно включать ее показатель деформации в расчет накопленной другими частицами деформации

неправомерно.

На рис. 5 дано графическое пояснение сказанного выше.



Рис. 5. Схема, поясняющая нелегитимность суммирования деформации вдоль линии (слоя) ТИХ

Действительно, если принять, что материальная частица A_i сплошной среды зарождается на границе раздела твердой и жидкой фаз, то положение ее в объеме твердой фазы фиксировано и определяется в соответствии с рис. 5 расстоянием от нейтральной линии, либо от поверхности малого радиуса. Общеизвестно [3], что линия (слой) температурного интервала хрупкости отстоит от границы твердой и жидкой фаз на некотором расстоянии (10-15 мм), и на этом пути к ТИХ частица A_i претерпевает некоторую деформацию, которая и есть началом истории ее деформации. В точке пересечения траектории частицы A_i с линией ТИХ (точка V_i) ее свойства изменяются (охрупчивание), а ее показатель деформации определяется расстоянием (h_i) от нее до нейтральной линии слитка и изменением радиуса кривизны R_i .

На рис. 5 видно, что история деформирования точек V_1, V_2, V_3 и т.д. различна, а потому суммировать их деформации неправомерно, т.к. такое действие противоречит основным положениям механики сплошных сред.

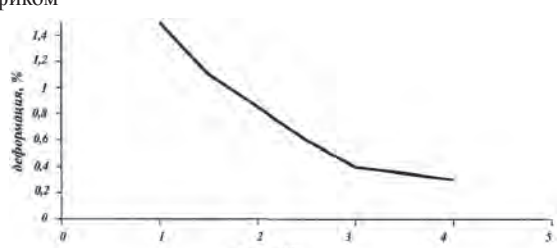
Критерии оптимальности кривой выпрямления непрерывнолитого слитка

Исследование напряженного и деформированного состояния непрерывно литого слитка – одна из наиболее сложных, но и наиболее популярных тем научных изысканий в области непрерывной разливки стали.

Многообразие физических моделей процесса, разнообразие математического аппарата, использованного в исследованиях, разноречивая терминология, используемая для описания технологических процессов, на сегодняшний день представляет собой довольно объемный массив, который сложно усвоить без критического осмысления. К сожалению, критических работ, которые бы подводили черту на каждом временном этапе развития технологии непрерывной разливки и отсеивали устаревшие сведения и приемы исследования процесса, практически нет. Такое положение не может считаться нормальным, т.к. отвлекает научный потенциал на развитие малоперспективных, а иногда и тупиковых направлений.

Ниже сделана попытка (таблица) свести воедино представления различных авторов и научных коллективов о параметрах оптимизации процесса деформации непрерывнолитого слитка на стадии его деформирования в двухфазном состоянии.

Таблица. Параметры оптимизации и их оценка по данным различных авторов (в терминах авторов)

Источник	Параметр оптимизации	Качественная или количественная оценка
[6]	1. Деформация слоев металла в каждой точке 2. Деформация и ее скорость в каждой точке разгиба	1. Минимально допустимая 2. Постоянная
[13]	Предельно допустимая деформация растяжения	0,2-0,3 %.
[12]	Допустимая относительная деформация [ε]	Для поверхностных слоев [ε] ≈ 1,25 %. Для границы жидкой и твердой фаз [ε] ≈ 0,20 %.
[14]	Максимальное относительное удлинение	Для углеродистых сталей при T = 1410-1385 °C [ε] = 0,23-0,44 %; T = 1300 °C [ε] = 2,2 %
[15]	Относительное удлинение	Сталь с C = 0,18 % и v _{разл.} = 0,7-1,35 м/мин [ε] ≤ 0,2 % вблизи температуры солидус
[11]	Допустимая относительная деформация [ε]	Деформации на фронте кристаллизации не должны превышать допустимую величину при v _{разл.} ≤ 1,5 м/мин: [ε] = 0,5-0,6 % - верхняя часть МНЛЗ; [ε] = 0,2-0,3 % в районе «зумпфа».
[3]	Критические значения показателя пластичности стали ε _{доп.}	Непревышение величины относительной деформации на каждом из роликов загиба (выпрямления): [ε] ≤ 0,2-0,25 %; [ε̇] = 10 ⁻⁴ - 10 ⁻² с ⁻¹
[11]	Допустимая относительная деформация [ε] на фронте кристаллизации, в %	[ε] = 0,21501 - 0,00034 × L ² + 0,12155 × (v _{разл.}) ² , где L - расстояние от мениска, мм; v _{разл.} - скорость разливки, м/мин
[9]	1. Деформация наружных и внутренних слоев на каждом отрезке пути 2. Скорость деформации наружных слоев	1. Минимальная. Для сталей с C = 0,2-0,8 % и (Mn/S) = 39-100 ε = ε̇ ^{-0,2142} × exp[-2,748-1,239×C+0,00929×(Mn/S)×C] при ε̇ = 10 ⁻⁵ -10 ⁻³ с ⁻¹ 2. Наименьшая, при деформации равномерно распределенной по длине участка правки
[11]	Допустимая относительная деформация [ε] переменная по длине технологической линии	Зависимость критической деформации от времени кристаллизации по длине технологической линии МНЛЗ определяется графиком  (сталь с C = 0,03-0,07 %; v _{разл.} ≈ 2,5 м/мин; C = 0,07-0,22 %; v _{разл.} ≈ 1,8 м/мин)

Из таблицы следует, что большинство исследователей считают, что наиболее полно процесс деформации непрерывнолитого слитка может быть охарактеризован такими параметрами:

- относительная деформация;
- скорость деформации.

Правильно сформированная физическая модель должна обеспечить ограничение выше приведенных параметров сверху. Опубликованные по этому вопросу материалы в своем большинстве показывают, что оптимальные значения относительной деформации находятся в пределах [ε] = 0,2-1,2 %, а скорость деформации не более [ε̇] = 10⁻⁴-10⁻² с⁻¹.

Вместе с тем остается открытым вопрос о влиянии скорости деформации на величину предельной деформации. На рис. 6 приведены данные А. Палмерса и др. [15], полученные путем растяжения образцов из углеродистых сталей на растяжной машине «Инстрон» при малых скоростях деформации и тем-

пературе 1400 °C. Эти данные однозначно свидетельствуют, что с увеличением скорости деформации в пределах ε̇ = 5,55 × 10⁻⁵ - 2,78 × 10⁻³ с⁻¹ предельное относительное удлинение или пластичность стали увеличивается.

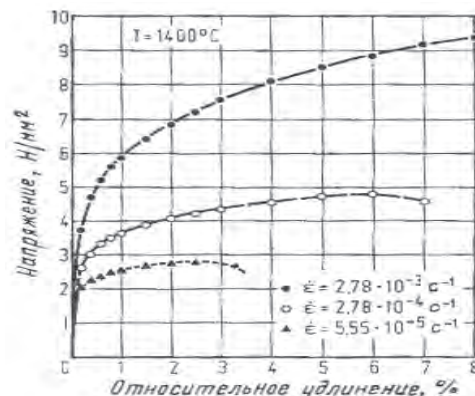


Рис. 6. Влияние скорости деформации на кривую «нагрузка-удлинение» (сталь, содержащая 0,185 % C) [5]

Аналогичные данные получены в работе А.М. Лясс и Чжоу-Яо-Хо [14]. На рис. 7 представлены результаты исследования механических свойств сталей, деформированных при температуре 1385-1410 °С со скоростью 9 мм/сек ($\dot{\epsilon} = 0,3 \text{ c}^{-1}$) – кривая 1; 6 мм/с ($\dot{\epsilon} = 0,2 \text{ c}^{-1}$) – кривая 2; 3 мм/с ($\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ c}^{-1}$) – кривая 3. Как отмечается в работе [5], такое явление, т.е. увеличение пластичности стали при увеличении скорости деформации наблюдается при скоростях деформации, близких к скоростям при ползучести. Другие авторы [8, 10, 11] принимают, что с увеличением скорости деформации пластичность стали уменьшается, а потому скорость деформации следует ограничивать.

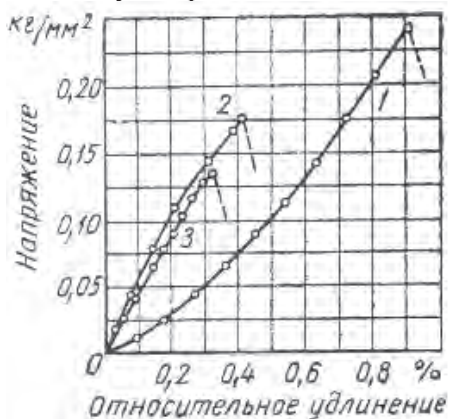


Рис. 7. Влияние скорости деформации на кривую «нагрузка-удлинение» [14]

Интерпретация такому противоположному проявлению зависимости пластичности стали от скорости деформации дана в работе [14]. Авторы считают, что «... в одних условиях процесс деформации металла развивается преимущественно за счет перемещения атомов межкристаллических прослоек (диффузионная деформация), а в других – за счет перемещения атомов кристаллической решетки зерен (сдвиговая деформация). Развитию деформации первого вида способствуют такие факторы, как мелкозернистое строение металла, высокие температуры, небольшие скорости деформации, и, наоборот, второму виду деформации способствует крупнозернистое строение металла, низкие температуры и большие скорости деформации».

Выводы

1. Выполнен критический анализ известных физических моделей процесса разгиба частично закристаллизовавшегося непрерывнолитого слитка в условиях криволинейной МНЛЗ, которые можно условно классифицировать как точечные и послойные.

2. Установлено, что допущения, принятые в точечных физических моделях противоречат фундаментальному принципу аддитивности показателя относительной деформации в интерпретации Коши. В свою очередь, послойные модели требуют обоснования законности определения суммарной относительной деформации материальных частиц закристаллизовавшейся зоны слитка, расположенных вдоль линии температурного интервала хрупкости.

3. В качестве критерия допустимости рационального режима разгиба слитка, исключающего нарушение сплошности металла необходимо совместно использовать два показателя: относительная деформация и скорость деформации.

Библиографический список

1. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Металлургия. – 1977. – 336 с.
2. Евстратов В.А. Теории обработки металлов давлением. – Харьков: Вища школа, 1981. – 248 с.
3. Смирнов А.Н., Гридин С.В., Белобров Ю.Н. и др. Расчет параметров загиба и разгиба непрерывнолитой заготовки для МНЛЗ различной конструкции // Металл и литье Украины. – 2002. – № 12. – С. 7-10.
4. Гридин С.В., Редько Г.А., Цупрун А.Ю. и др. Многофакторная математическая модель для расчета конструктивных и технологических параметров современной слябовой МНЛЗ // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2003. – № 8. – С. 37-43.
5. Бровман М.Я., Сурин Е.В., Грузин В.Г. и др. Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки стали. – М.: Металлургия, 1969. – 280 с.
6. Григорьев В.П., Нечкин Ю.М., Егоров А.В. и др. Конструкции и проектирование агрегатов сталеплавильного производства. – М.: МИСиС, 1995. – 512 с.
7. А.С. № 349238, Гельфенбейн Е.Ю., Карлинский С.Е., Нисковских В.М. и др. Установка непрерывной разливки металла. Оpubл. 05.05.74, Бюл. № 17.
8. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 271 с.
9. Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка. – М.: Металлургия, 1990. – 150 с.
10. Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохов Л.В. и др. Металлургические мини-заводы. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 469 с.
11. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П. и др. Машины непрерывного литья заготовок. – Казань: Марат, 2003. – 319 с.
12. Florchak J.V. Straight-v. curved-mould continuous casters for slab production // Ironmaking and Steelmaking. – 1979. - V. 6. - № 3. - P. 123-130.
13. Brimacombe J.K., Agarwal P.K. // 63rd National Open Heart and Basic Oxygen Steel Conference Proceeding. – Washington D.C. – NY. – 1980. – V. 63. – P. 235-252.
14. Лясс А.М., Чжоу-Яо-Хо. О некоторых факторах, влияющих на образование горячих трещин в стальных отливках // Литейное производство. – 1958. – № 3. – С. 20-24.
15. Пальмерс А., Этьен Ж., Миньон Ж. Расчет механических и термических напряжений в непрерывнолитой заготовке // Черные металлы. – 1979. – № 19. – М.: Металлургия. – 1980. – С. 3-11.

Поступила 24.10.2013