

УДК 621.746.047-423.1:539.4.014.11

Е.Н. Смирнов, д.т.н.
Донецкий национальный технический университет

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ БЛЮМОВ ПРИ ИХ ДЕФОРМИРОВАНИИ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО ЛИТЬЯ

Досліджені закономірності впливу керуючих факторів процесу деформування безперервнолитих блюмів на стадії неповної кристалізації на характер напруженого стану в металі з позиції можливого виникнення порушень суцільності.

Conformities to the law of influencing of managing factors process of deformation continuously casting bloom are probed on the stage of incomplete crystallization on character of the nascent tensile state from point of possible origins of failure

В условиях рыночных отношений первостепенное значение приобретает конкурентоспособность выпускаемой продукции, определяемая гарантированными показателями качества при низких материальных и энергетических затратах на ее производство. В этой связи, дальнейшее повышение конкурентоспособности сортового проката (особенно крупносортового) ответственного назначения из низколегированных сталей, используемого в различных подотраслях машиностроения (судоостроение, вагоностроение, горношахтного оборудования и т.д.), представляет собой сложную многофакторную проблему, актуальность решения которой для Украины определяется потребностью рынка и стремлением производить конечную продукцию, отвечающую мировым требованиям [1, 2].

Одним из направлений дальнейшего повышения эффективности производства крупносортового проката ответственного назначения является использование непрерывнолитых блюмов (или передельной заготовки из них) в качестве исходного сечения. В процессе освоения новых технологических схем очень важно иметь высокое качество исходного непрерывнолитого слитка. В современных условиях решение поставленной задачи достигается за счет комплексного воздействия на кристаллизующийся слиток на различных технологических участках МНЛЗ, в том числе, и путем их деформирования на стадии неполной кристаллизации [3 - 5].

Целью работы является исследование средствами математического моделирования влияния факторов процесса деформирования непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации на характер возникающего напряженного состояния.

В работах [6 - 9] представлены результаты исследования процесса деформирования непрерывнолитого блюма сечением 335x400 мм с использованием экспериментальных методов механики деформируемого твердого тела. В рамках дальнейшего расширения программы всестороннего изучения вышеназванного процесса, выполнено расчётно-аналитическое исследование напряжённо-деформированного состояния (НДС) непрерывнолитых блюмов, возникающего при их деформировании на стадии неполной кристаллизации. Задача реализована в двумерной контактной упругопластической постановке по модели Прандтля-Райса с использованием программного комплекса ANSYS методом конечных элементов. В расчётах учитывали зависимость механических свойств металла от температуры, возникающие температурные градиенты по сечению закристаллизовавшейся составляющей слитка, а также возможное совместное деформирование закристаллизовавшейся составляющей слитка и редуцирующих валков. Учёт гидродинамического давления [10], действующего в противоположных направлениях с силами от внешнего деформационного воздействия, производили посредством задания соответствующих свойств жидко-твёрдой составляющей кристаллизующегося блюма.

С учётом вышеизложенных соображений и технологического оформления участка совмещения непрерывной разливки с внешним деформационным воздействием [11], принята для расчётного исследования НДС блюмов сечением 335x400 мм, отливаемых в технологической линии МНЛЗ ОАО «ДМКД», совокупность исходных данных, которая приведена в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные к расчётному исследованию НДС блюма сечением 335x400 мм по клетям редуцирующего блока [11]

Марка стали	Технологические и конструктивные параметры			
	Скорость разливки V , м/мин	Металлурги-ческая длина слитка L , м	Время кристаллизации τ , с	Температурный градиент в вертикально-продольной плоскости симметрии, θ
09Г2С (I группа)	0,9	13,5	900	0,235
	0,7	15,2	1300	0,248
	0,6	17,0	1700	0,288
А32 (I группа)	0,9	13,5	900	0,233
	0,7	15,2	1300	0,250
	0,6	17,0	1700	0,296
Ст 3 (II группа)	0,9	13,5	900	0,236
	0,7	15,2	1300	0,249
	0,6	17,0	1700	0,294
40Х (II группа)	0,9	13,5	900	0,239
	0,7	15,2	1300	0,255
	0,6	17,0	1700	0,280
70 (III группа)	0,9	13,0	900	0,219
	0,8	14,7	1100	0,228
	0,7	17,5	1500	0,243

В общем случае, термонапряженное состояние слитка в процессе непрерывной разливки имеет сложный характер, определяемый ферростатическим давлением, усилием вытягивания, изгибом и неравномерностью температурного поля в закристаллизовавшейся составляющей. Дополнительные внешние воздействия, связанные с реализацией технологии деформирования непрерывнолитых слитков на стадии неполной кристаллизации, приводят к возникновению дополнительных растягивающих напряжений, вследствие чего результирующие напряжения могут превысить критический предел, необходимый для образования и развития внутренних трещин. Именно это обстоятельство и предопределило индивидуальный характер параметров технологии обжатия непрерывнолитых слитков на стадии неполной кристаллизации для каждого конкретного случая.

В соответствии с положениями теории пластичности металлов [12 - 14], вероятность зарождения на том или ином участке закристаллизовавшейся составляющей непрерывнолитого блюма нарушений сплошности, в том числе и внутренних, наиболее удобно оценивать путём сравнения интенсивности напряжений σ_i на рассматриваемом участке с пределом прочности металла σ_b при его температуре [15]. В том случае, когда $\sigma_i < \sigma_b$, вероятность появления нарушений сплошности, при прочих равных условиях, незначительна. В противном случае, т.е. когда $\sigma_i > \sigma_b$, происходит зарождение трещины. Однако следует иметь в виду, что в области температур близких к температуре плавления, механические свойства стали достаточно однородны, а в области относительно низких температур, характерных для углов непрерывнолитого слитка, они могут различаться существенно. Вследствие этого разброс значений нагрузок достигает 15...40% в зависимости от марочного состава и формы сечения слитка [16], снижает ценность получаемых результатов с точки зрения их последующего практического использования [17].

Схема направлений исследований и контрольных точек (рис. 1) была выбрана в соответствии с результатами исследования деформированного состояния [7]. Результаты расчётного исследования для условий разливки стали 09Г2С (I группа) приведены на рисунках 2-4. Величину σ_b рассчитывали в соответствии с методикой изложенной

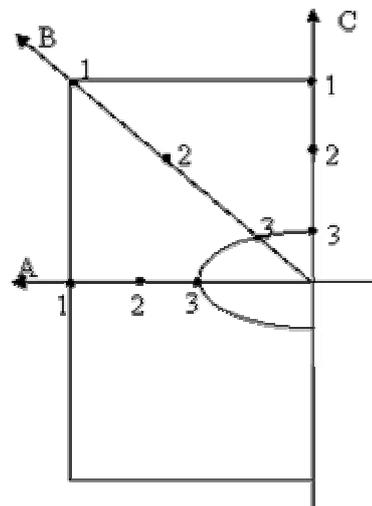


Рис. 1. Схема направлений и контрольных точек к исследованию напряжённого состояния блюма

в работе [18] и представляли в виде интервала значений (плоскостей) от минимального - σ_b^{\min} до максимального - σ_b^{\max} .

Как следует из приведенных зависимостей, полученные плоскости расчётных значений σ_i при их пересечении плоскостями σ_b^{\min} и σ_b^{\max} , условно делятся (в большинстве случаев) на три области, каждая из которых характеризует определённую вероятность возникновения нарушений сплошности. Для области значений σ_i , лежащей от минимальных расчётных значений до линии σ_b^{\min} , вероятность образования нарушений сплошности носит минимальный характер или полностью отсутствует, так как $\sigma_i \leq \sigma_b^{\min}$. Для второй области значений σ_i , лежащей в интервале значений от $\sigma_b^{\min} \leq \sigma_i \leq \sigma_b^{\max}$, вероятность образования нарушений сплошности имеет высокий уровень. Вместе с тем нельзя однозначно утверждать, что в результате реализации деформационного воздействия не произойдёт образования трещин. Для третьей области значений, когда $\sigma_i \geq \sigma_b^{\max}$, приложение деформационного воздействия будет сопровождаться, очевидно, во всех случаях нарушениями сплошности.

Сопоставление величины σ_i по выбранным направлениям исследования (рис. 2) показывает, что наибольший градиент наблюдается в направлениях B и A (см. рис. 1). В тоже время, наименьший градиент величины σ_i наблюдается в направлении C. Его величина в 3,0...3,3 раза меньше, чем в направлении B и в 1,7...2,0 раза - чем в направлении A. Данный факт хорошо согласуется с существующими представлениями [19,20] о высокой вероятности образования трещин в переохлажденных углах непрерывнолитого слитка.

С точки зрения анализа вероятности образования внутренних нарушений сплошности очевиден и тот факт, что область допустимых значений ϵ_i имеет минимальную величину, обусловленную тем обстоятельством, что при этих температурах $\sigma_b^{\min} \approx \sigma_b^{\max}$. При этом, для направления A и B допустимая величина обжатия ϵ_i не превышает 0,5%, что применительно к условиям стали 09Г2С равнозначно абсолютному перемещению (сближению) фронтов кристаллизации на уровне 1,0 мм или $\epsilon_{np} = 0,3\%$ (см. рис. 2 а, тока 3). В тоже время, для направления C при

минимальных значениях θ величина допустимых обжатий ε_i может достигать 2,0% (см. рис. 2 с, точка 3). Однако, по мере роста величины θ (клетки 3,4,5), величина допустимых обжатий ε_i уменьшается. Анализ изменения σ_i в контрольных точках по сечению непрерывнолитого бляма, отливаемого из стали 40X и стали 70 показал схожести возникающего НДС.

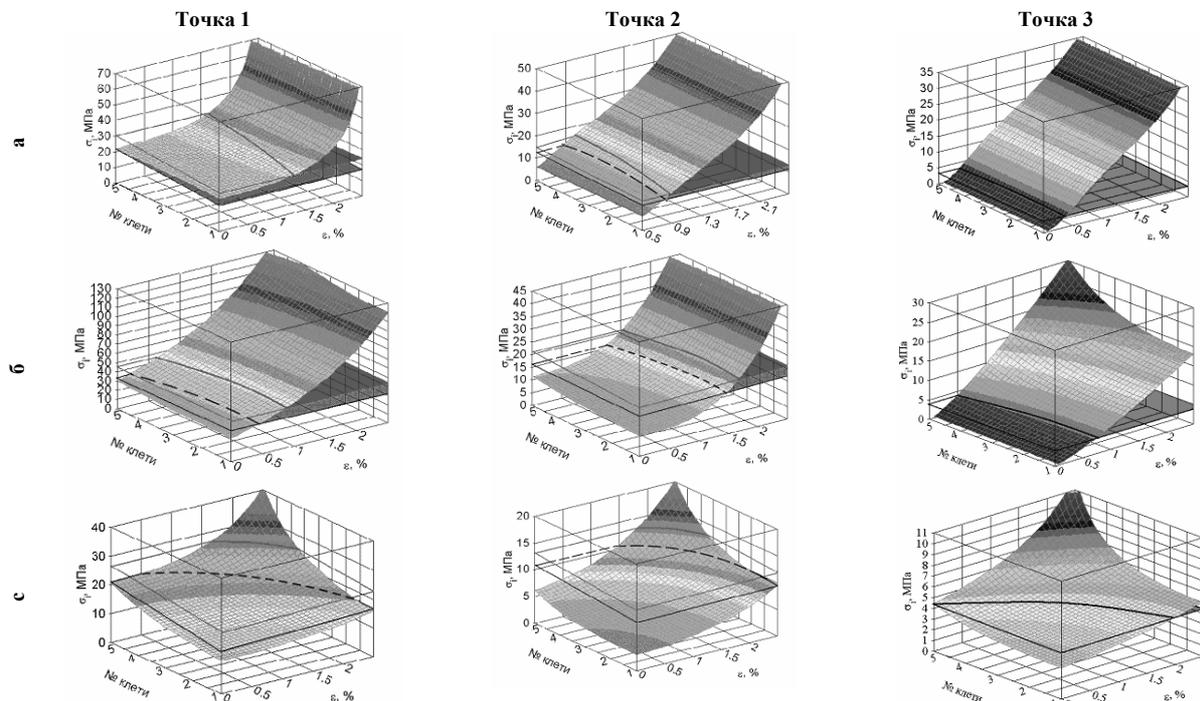


Рис. 2. Изменение интенсивности напряжений σ_i в сечении непрерывнолитого бляма 335x400 мм, сталь 09Г2С: а - направление А; б - направление В; в - направление С; — σ_b^{\max} ; - - - σ_b^{\min}

Выводы

Смоделированы условия деформирования непрерывнолитого бляма сечением 335x400 мм на стадии неполной кристаллизации и решены в двумерной упругопластической постановке по модели Прандтля-Райса методом конечных элементов. На основании результатов расчетного исследования. Анализ результатов выполненного расчётного исследования НДС металла непрерывнолитых блямов позволил установить, что с точки зрения анализа вероятности образования внутренних нарушений сплошности установлено, что область допустимых значений ε_i имеет минимальный интервал значений, обусловленный тем обстоятельством, что при температурах металла, близких к температуре кристаллизации, колебания величины его предела прочности минимальны, т.е. $\sigma_b^{\min} \approx \sigma_b^{\max}$. В этом случае для поперечного и диагонального направлений допустимая величина обжатия ε_i не превышает 0,5%, что применительно к условиям стали 09Г2С равнозначно сближению фронтов кристаллизации $\Delta h_{\phi} \approx 1,0$ мм или $\varepsilon_{пр} = 0,3\%$. Для высотного направления при минимальных величинах θ величина допустимых обжатий ε_i может достигать 2,0%. Однако по мере роста θ их величина уменьшается.

Список литературы

1. Педько А. Б. Интеграційні процеси в чорній металургії - історична ретроспекція і сучасний стан / А. Б. Педько // Металургическая и горнорудная промышленность. - 2008. - №2. - С. 4-7.
2. Большаков В. И. Пути инновационного развития металлургии Украины / В. И. Большаков // Металургическая и горнорудная промышленность. - 2003. - №4. - С. 1-3.
3. Improvement of internal quality of blooms continuously cast at Sollac Florange / J. Bastian, P. Chapellier, L. Sosin [ea.] // La Rev. Metalurgie. - 1997. - №94. - P. 497-505.
4. Improvement of segregation of continuously cast billet by soft reduction / K. Isobe, Y. Kusano, S. Noguchi [ea.] // Proc. Near-Net-Shape Casting in the Minimills, CIM: Vancouver, 1995. - Vancouver: 1995. - P. 179-192.
5. Sivessen P. B. Improvement of Center Porosity in Continuously Cast Blooms by Mechanical Soft Reduction at the End of the Solidification Process / P. Sivessen, S. Wass, B. Rogberg // 3rd European Conf. of Continuous Casting: Madrid, 20-30 October 1998. - Madrid: 1998. - P. 213-223.
6. Белевитин В. А. Повышение точности и достоверности расчета параметров пластической деформации при прокатке / В. А. Белевитин, Е. Н. Смирнов // науч. пр. Донец. держ. техн. ун-ту. Сер., Металлургия. - Донецьк: ДонНТУ, 2002. - Вип. 10(141). - С. 47-52.

7. Смирнов Е. Н. Исследование деформированного состояния непрерывнолитых блюмов при пластическом формоизменении на стадии кристаллизации / Е. Н. Смирнов, В. А. Белевитин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. праць – Краматорськ: ДДМА, 2008. - №1 (11). – С. 166 – 172.
8. Смирнов Е. Н. Исследования формоизменения непрерывнолитых блюмов и эффективности процесса деформирования на стадии кристаллизации методами физического моделирования / Е. Н. Смирнов // Вісник Східноукраїнського національного університета ім. В. Даля: наук. журнал – Луганськ: Вид-во СНЦ ім. В. Даля, 2008. - №8 (126). – Ч.2. – С.162-167.
9. Смирнов Е. Н. Кинематические параметры процесса деформации непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации / Е. Н. Смирнов, В. А. Белевитин // наук. пр. Донец. держ. техн. ун-ту Сер., Metallurgy. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – Вип. 11(159). – С. 154-164.
10. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок [Текст] / В. А. Емельянов. – М.: Metallurgy, 1988. – 143с.
11. Смирнов Е. Н. Технологическое проектирование участка деформирования непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации / Е. Н. Смирнов // Донбасс: - 2020: наука і техніка – виробництву: матеріали IV наук. – практ. конф., Донецьк, 27-28 трав. 2008 р. / Донецк. нац. техн. ун-т. – Донецьк: Вид-во ДонНТУ, 2008. – С. 173-177.
12. Полухин П. И. Физические основы пластической деформации : [учебное пособие для вузов] / Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. - М.: Metallurgy, 1982. - 584 с.
13. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Георгий Александрович Смирнов-Аляев. - Л.: Машиностроение, 1978. - 368 с.
14. Черняк Н. И. Механические свойства стали в области малых пластических деформаций / Николай Ильич Черняк. - К.: Изд-во АН УССР, 1962. - 104 с.
15. Пластичность и разрушение / [В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов, Б. А. Мигачёв и др.]. - М.: Metallurgy, 1977. - 336 с.
16. Математическая модель и расчёт параметров мягкого обжатия непрерывнолитых заготовок / Л. В. Буланов, Н. А. Юровский, Т. Г. Химич [и др.] // Metallurgical and mining industry. - 2003. - №8. - С. 126-130.
17. Byrne C., Tercelli C. Mechanical Soft reduction in billet casting / C. Byrne, C. Tercelli // Steel Times International. Continuous casting. - 2002. - october. - P. 37-40.
18. Теория прокатки: справочник / [А. И. Целиков, А. Д. Томлёнов, В. И. Зюзин и др.]. - М.: Metallurgy, 1982. - 335с.
19. Самойлович Ю. А. Системный анализ кристаллизации слитка / Юрий Авраамович Самойлович. - Киев: Наук.думка, 1983. - 246с.
20. Евтеев Д.П. Непрерывное литье стали / Д. П. Евтеев, И. Н. Колыбалов. - М.: Metallurgy, 1984. - 260 с.