



The methods of calculation of probability of crosscut cracks in circular ingot, poured at MNLZ, allowing to take into account the peculiarities of plastic deformation of slug, is offered. The calculations of probability of crosscut cracks in ingot with diameter 140 mm of low-carbon steel are presented on the example of slug with circular section.

А. Н. ЧИЧКО, БНТУ, В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ»,
Д. М. КУКУЙ, О. И. ЧИЧКО, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, БНТУ,
А. В. ДЕМИН, РУН «БМЗ»

УДК 519:669.27

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ТРЕЩИН В СЛИТКЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО В МНЛЗ ПРИ УЧЕТЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ

Моделирование деформационного состояния слитка, получаемого в МНЛЗ, позволяет определить распределение напряжений, которые являются причиной зарождающихся трещин. На образование трещин, с одной стороны, влияют технологические режимы разлива (скорость, движение слитка, условия охлаждения в ЗВО, в кристаллизаторе), с другой – пластические свойства стали (зависимости модуля Юнга от температуры, предела прочности и текучести от температуры). Если в некоторой области получаемого слитка достигаются критические значения деформаций, то в ней и образуются различные виды трещин. Причем направление развития трещин зависит от значения элементов тензора деформации, который является функцией температуры.

Проблема расчета напряжений, формирующихся при разливе стали в слитках, – одна из важнейших задач теории металлургических процессов [1]. В [2–5] был предложен численный метод расчета продольных термических напряжений, формирующихся при разливе стали в круглые слитки, и исследована их динамика по длине слитка.

Цель настоящей работы – разработка метода расчета вероятности образования дефектов деформационного происхождения, возникающих при продольных напряжениях и приводящих к поперечным трещинам в круглом сечении слитка, при заданных тепловых и конструктивных параметрах МНЛЗ-1, используемой на РУП «БМЗ».

Разработанная математическая модель развития продольных напряжений и пластических деформаций в непрерывнолитом слитке, описанная в [3], позволяет рассчитывать охлаждение слитка определенного диаметра при заданных характери-

стиках стали и технологического процесса МНЛЗ. Полученные зависимости по распределению напряжений и деформаций в различных сечениях слитка дают возможность оценить вероятность образования трещин по уровню близости рассчитанных напряжений к их критическим значениям для конкретной марки стали. Ниже предлагается методика оценки деформационного состояния моделируемого слитка в терминах вероятности образования трещин в различных точках поперечного сечения.

Пусть кристаллизовавшаяся сталь в некоторой области слитка имеет температуру T и деформация растяжения при данной температуре протекает по некоторому модельному закону для предела прочности $\sigma(\epsilon, T)$ (рис. 1), т.е. при относительной деформации стали в диапазоне изменения $0-\epsilon_y$, напряжение σ изменяется по закону Гука (упругая деформация), а при дальнейшем растяжении в диапазоне $\epsilon_y-\epsilon_{пр}$ происходит пластическая деформация стали. При деформации выше предельной $\epsilon_{пр}$, как правило, происходит разрыв металла, соответствующий образованию трещины.

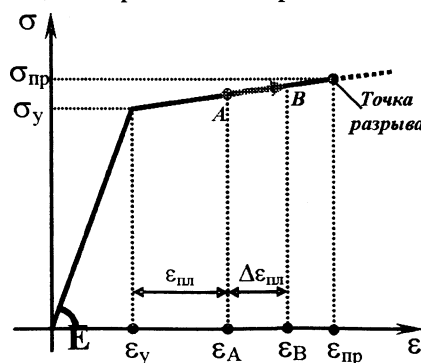


Рис. 1. Модельный закон роста напряжения и разрыва стали в зависимости от ее деформации

Пусть в некоторый момент времени τ_1 деформационное состояние стали в рассматриваемой области слитка $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ (рис. 2) соответствует точке A на рис. 1, т.е. сталь растянута на уровень относительной деформации $\epsilon_A > \epsilon_y$, при этом пластическая составляющая ее деформации равна $\epsilon_{пл}$. Заготовка движется в процессе разливки стали со скоростью v . В следующий момент времени τ_2 сталь подверглась дальнейшей деформации (ϵ_B) и ее деформационное состояние стало соответствовать точке B . При этом пластическая составляющая ее деформации возросла на $\Delta \epsilon_{пл}$. Хотя теоретически разрыв стали возникает при превышении предельной деформации, но практически он возможен с той или иной вероятностью при любой деформации стали. Возникает необходимость оценить вероятность образования разрыва при переходе стали из деформационного состояния A в состояние B .

Пусть вероятность образования разрыва при деформации стали имеет плотность распределения $f_r(\epsilon, T)$ (рис. 3). Причем значение предельной деформации $\epsilon_{пр}$ соответствует математическому ожиданию разрыва. Тогда вероятность разрыва P_{or} при деформации от ϵ_A к ϵ_B соответствует площади криволинейной трапеции $\epsilon_A A B \epsilon_B$ и определяется количественно по формуле:

$$P_{or} = \int_{\epsilon_A}^{\epsilon_B} f_r(\epsilon, T) d\epsilon. \quad (1)$$

В процессе разливки заготовки анализируемая область слитка (конечно-разностный элемент) перемещается по некоторой пространственной траектории. При этом изменяется его температура и накапливается пластическая деформация. Следовательно, вероятность образования трещины увеличивается. В этом случае можно определить вероятность образования трещины P_r в конце исследуемой траектории, если вероятность возникновения трещины на каждом элементарном шаге вычислить по формуле (1).

Пусть вероятность возникновения трещины на шаге i равна P_{ori} , а вероятность возникновения трещины на шаге $i+1$ равна P_{ori+1} . Тогда, согласно теории вероятности, вероятность образования трещины после шага $i+1$ можно найти по формуле:

$$P_{ri+1} = P_{ori} + P_{ori+1} - P_{ori} P_{ori+1}. \quad (2)$$

Для того чтобы вычислить вероятность наличия трещины в конце траектории, разбитой на n элементарных участков, нужно определить вероятность возникновения трещины на каждом i -м участке по формуле (1), а затем просуммировать все эти вероятности по формуле (2). Вероятность образования трещины в некоторой области слитка P_r в конце некоторого участка разливки принята в качестве основной характеристики трещинообразования получаемой заготовки.

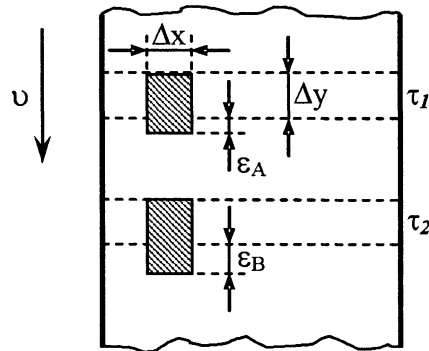


Рис. 2. Перемещение и деформация анализируемой области (конечно-разностного элемента) слитка в процессе вытяжки

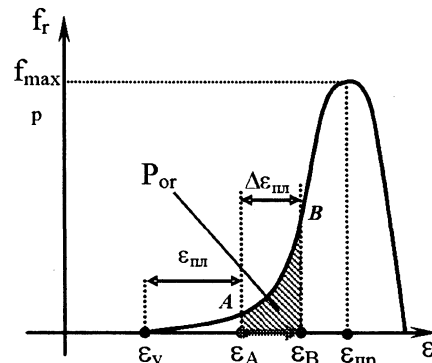


Рис. 3. Плотность распределения вероятности разрыва стали в зависимости от деформации

Ниже рассмотрен пример по определению вероятностных характеристик образования поперечных трещин в непрерывнолитой заготовке. В качестве объекта исследования была выбрана заготовка сечением в диаметре $d=140$ мм из стали Ст20. Размеры зон вторичного охлаждения и кристаллизатора соответствуют МНЛЗ-1, используемой на РУП «БМЗ». Скорость разливки принималась равной $v_1=2,2$ м/мин. Для исследования пространственного расположения дефектов было выбрано сечение $y=16$ м от уровня расплава, которое являлось результирующей суммарной деформационной составляющей движущегося слитка. Для этого сечения были проведены расчеты характеристик, связанные с вероятностью образования трещин. Для проведения расчетов использовали компьютерную программу «ПроНРС-1н».

На рис. 4 показана схема слитка, использованная при компьютерном моделировании с помощью модуля расчета трещин компьютерной системы «ПроНРС-1н».

На рис. 5 представлено распределение напряжений, приводящих к образованию поперечных трещин. Как видно из рис. 5, а, на внутренней области слитка в поперечном сечении $y=16$ м образуется значительная доля растягивающих напряжений, значения которых находятся в интервале 20–30 МПа. Причем область растягивающих напряжений смещена к внутренней по отношению к изгибу стороне слитка. На внешней обла-

сти образуются сжимающие напряжения, значения которых достигают -20 МПа на внутренней по отношению к изгибу стороне слитка и -43 МПа на внешней по отношению к изгибу стороне. Изменение напряжений по направлению x при фиксированной координате $z=70$ мм позволяет увидеть промежуточные значения формирующихся напряжений.

На рис. 6 показано распределение пластической деформации в этом же сечении. Как видно из рисунка, наиболее высокая доля пластических деформаций $1,1-1,3\%$ приходится на внутреннюю по отношению к изгибу сторону слитка. Из рис. 6, б видно, что высокие значения растягивающих напряжений (например, в центральной области слитка) необязательно приводят к его растяжению.

На рис. 7 приведено распределение вероятности образования поперечных трещин в поперечном сечении слитка. Как видно из рисунка, вероятность образования трещин достигает $p=78\%$ только при $x=40-50$ мм. На остальных участках этого сечения вероятность образования трещин не превышает $p=35\%$. Из рис. 7, б видно, что высокие значения деформации необязательно приводят к развитию трещин.

В таблице приведены количественные значения вероятности образования поперечных трещин в поперечном сечении слитка.

Из рис. 8 и таблицы видно, что высокая вероятность образования трещин наблюдается в сегменте с концентрической областью в виде полумесяца. Для определения причин образования возможных дефектов были построены зависимости изменения пластической и предельной дефор-

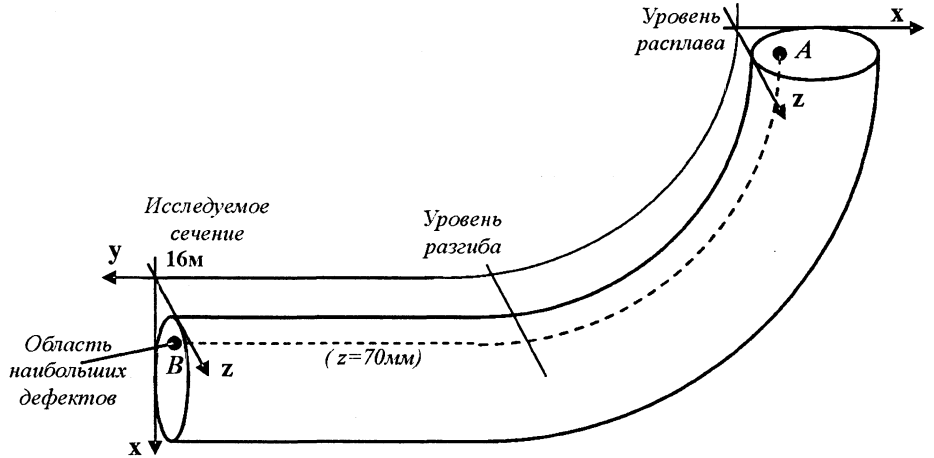


Рис. 4. Схема слитка и анализируемого сечения, использованная при компьютерном моделировании развития в нем поперечных трещин

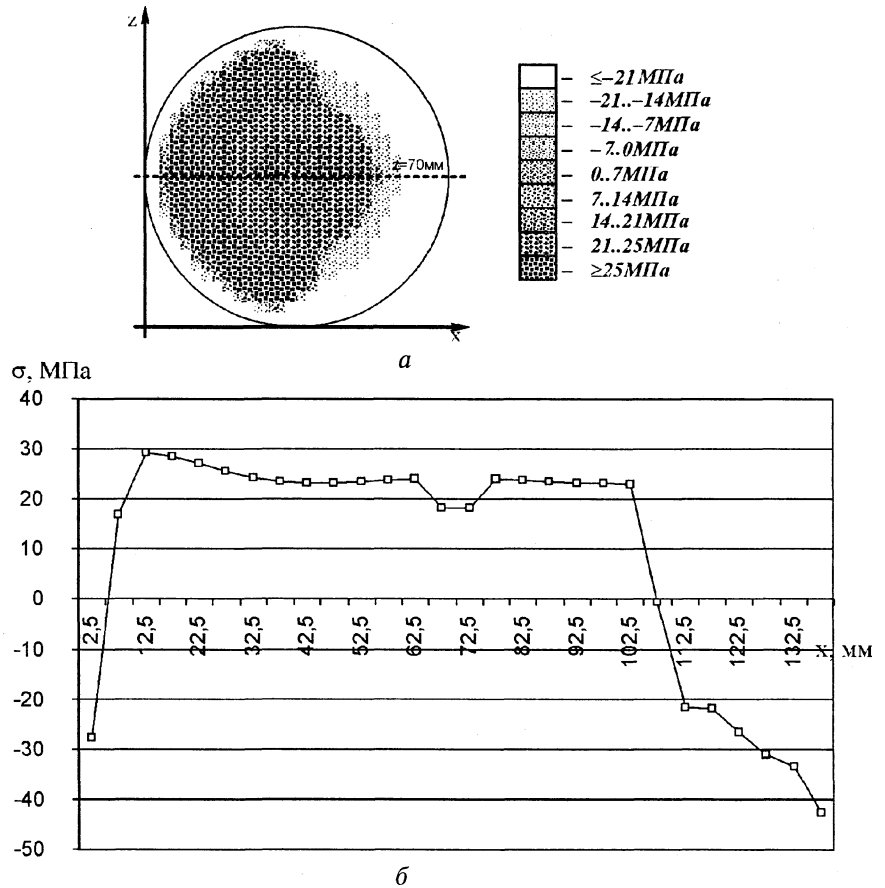


Рис. 5. Распределение напряжений по поперечному сечению слитка на расстоянии 16 м от уровня расплава (а) и график напряжений вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения

маций по направлению координаты y при фиксированных значениях $x=42,5$ мм и $z=70$ мм. Анализ этой пространственной линии слитка связан с тем, что в этом направлении накопление дефектов деформации наибольшее (см. рис. 5-7). Для более детального исследования причин возникновения трещин на уровне $\sim 7,85$ м были сопоставлены значения пластической деформации растяжения, которую испытывает заготовка в дан-

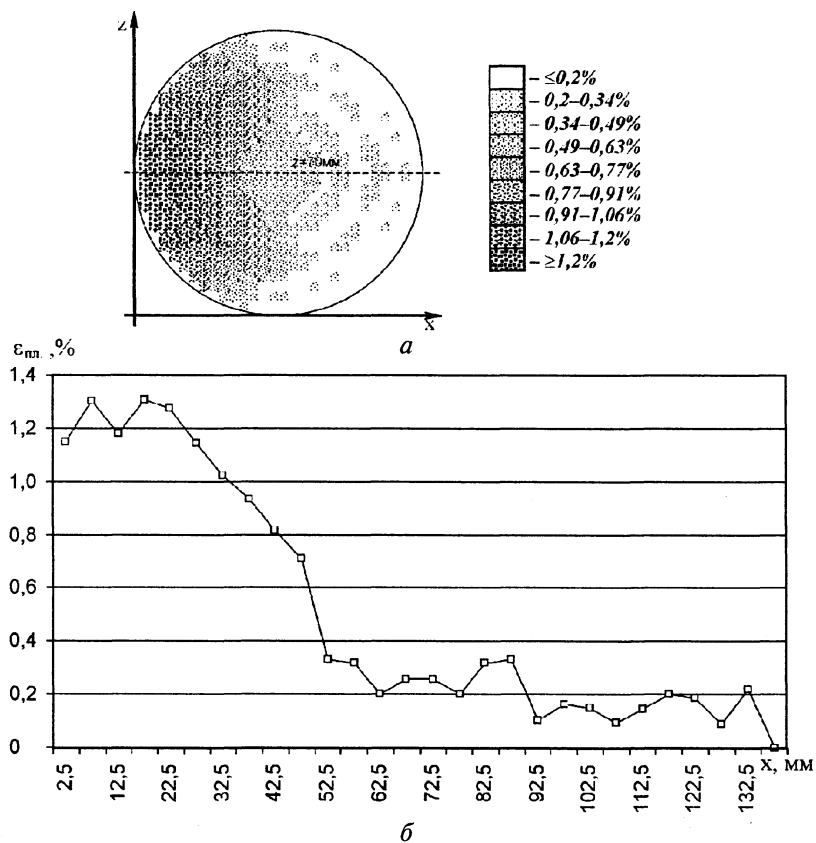


Рис. 6. Распределение пластической деформации по поперечному сечению слитка на расстоянии 16 м от уровня расплава (а) и график пластической деформации вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения

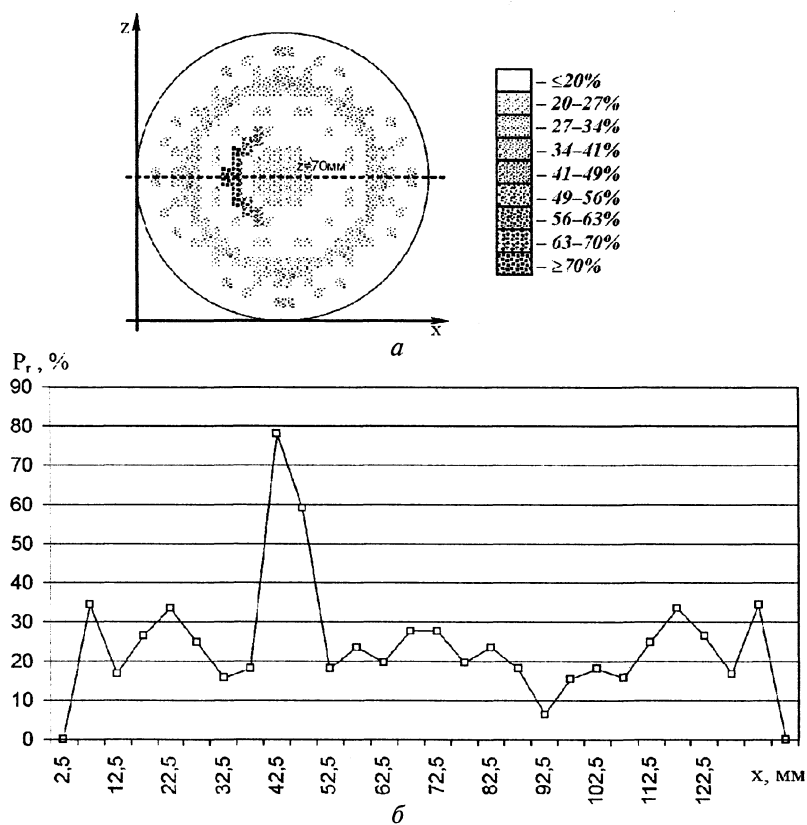


Рис. 7. Распределение вероятности образования трещин по поперечному сечению слитка на расстоянии 16 м от уровня расплава (а) и график вероятности наличия поперечных трещин вдоль линии $z=70$ мм (б) этого сечения

Распределение вероятности образования трещин в поперечном сечении слитка на расстоянии 16 м от уровня расплава при скорости разливки 2,2 м/мин

x \ z	2,5	7,5	13	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78	83	88	93	98	103	108	113	118	123	128	133	138	
2,5																													
7,5													14,7	34,5	34,5	14,7													
12,5											3,39	29,1	12,1	2,26	16,6	16,6	2,26	12	29,1	3,39									
17,5										33,1	14,7	1,83	22,5	7,51	26,3	26,3	7,51	22,5	1,83	14,7	33,1								
22,5							15,9	17,9	9,35	8,17	15,8	24,1	27,6	33,3	33,4	27,6	24,1	15,8	8,17	9,35	17,9	15,9							
27,5					19	7,28	2,4	,76	22,1	28,3	27,1	26,9	25	25	26,8	27,1	28,2	22,2	,76	2,5	7,27	19							
32,5				15,9	7,28	4,94	21,3	32,5	19,8	18	15,7	16,6	15,8	15,8	16,6	15,8	18	19,9	32,6	21,3	4,94	7,28	15,9						
37,5				17,9	2,4	21,3	31,9	23,3	1,9	18,6	19,9	22,6	18,1	18,1	22,6	2	18,6	1,9	23,3	31,8	21,3	2,5	17,9						
42,5				33,1	9,36	,76	32,5	23,3	17,8	12,5	18	18,4	15,1	15,4	15,3	15,1	18,4	18	13	17,9	23,2	32,5	,76	9,36	33,1				
47,5			3,38	14,6	8,17	22	19,6	1,9	12,6	2	15,8	42,1	27,6	13,8	6,33	9,12	15,1	15,7	2	13,1	1,9	2	22	8,17	14,7	3,39			
52,5			29	1,83	15,8	28,2	18	18,7	17,9	15,8	52,3	41,3	18,5	18	18	18,5	7,11	12,5	15,8	18	18,6	18	28,2	15,8	1,83	29			
57,5			12,1	22,5	24,1	27,1	15,6	19,9	18,4	65,1	51,4	15,6	21,6	23,6	23,6	21,6	16	7,11	15,1	18,4	2	15,6	27,1	24,1	22,5	12,1			
62,5			14,6	2,26	7,52	27,6	26,9	16,6	22,6	15,1	6,3	18,5	21,6	2,6	19,8	19,8	2,6	21,6	18,5	9,11	15,2	22,6	16,5	26,8	27,6	7,51	2,26	14,7	
67,5			34,5	16,6	26,3	33,5	24,9	15,8	18,1	78,2	59,1	18	23,6	19,8	27,9	27,9	19,8	23,6	18	6,33	15,3	18	15,8	24,9	33,5	26,4	16,6	34,5	
72,5			34,5	16,6	26,3	33,5	24,9	15,8	18,1	78,2	59,1	18	23,6	19,8	27,9	27,9	19,8	23,6	18	6,33	15,3	18,1	15,8	24,9	33,5	26,3	16,6	34,5	
77,5			14,6	2,26	7,52	27,6	26,9	16,6	22,6	15,1	6,3	18,5	21,6	2,6	19,8	19,8	2,6	21,6	18,5	9,11	15,2	22,6	16,5	26,7	27,6	7,51	2,26	14,7	
82,5			12,1	22,5	24,1	27,1	15,6	19,9	18,4	65,1	51,4	16,1	21,6	23,6	23,6	21,6	15,8	7,11	15,1	18,4	2	15,7	27,1	24,1	22,5	12,1			
87,5			29	1,83	15,8	28,2	18	18,7	17,9	15,8	52,3	41,3	18,5	18	18	18,5	7,11	12,5	15,8	18	18,6	18	28,2	15,8	1,83	29			
92,5			3,38	14,6	8,17	22	19,6	1,9	12,6	2	15,8	42,1	27,6	13,8	6,33	9,12	15,1	15,7	2	13	1,9	2	22	8,17	14,7	3,39			
97,5			33,1	9,36	,76	32,5	23,3	17,8	12,7	17,9	18,4	15,1	15,4	15,3	15,1	18,4	18	12,8	17,9	23,2	32,5	,76	9,36	33,1					
102,5			17,9	2,4	21,3	31,9	23,3	1,9	18,6	19,9	22,6	18,1	18,1	22,6	2	18,6	1,9	23,3	31,8	21,3	2,5	17,9							
107,5			15,9	7,28	4,94	21,3	32,5	19,8	18	15,7	16,6	15,8	15,8	16,6	15,8	18	19,9	32,6	21,3	4,94	7,28	15,9							
112,5			19	7,28	2,4	,76	22,1	28,3	27,1	26,9	25	25	26,8	27,1	28,2	22,2	,76	2,5	7,27	19									
117,5			15,9	17,9	9,35	8,17	15,8	24,1	27,6	33,3	33,4	27,6	24,1	15,8	8,17	9,36	17,9	15,9											
122,5			33,1	14,7	1,83	22,5	7,51	26,3	26,3	7,51	22,5	1,83	14,7	33,1															
127,5			3,39	29,1	12,1	2,26	16,6	16,6	2,26	12	29,1	3,39																	
132,5			14,7	34,5	34,5	14,7																							
137,5																													

ной точке, со значениями предельно допустимой деформации стали при температуре, соответствующей температуре слитка в этой точке (рис. 9). Как видно из рисунка, наибольший скачок вероятности разрыва наблюдается на уровне 7,85 м, что соответствует области разгиба слитка.

Проведенный анализ показал, что на интервале ~7–9 м вдоль исследуемого направления сталь имеет низкие пластические свойства ($\epsilon_{пл} < 0,3\%$) и пластическая деформация растяжения в момент разгиба превышает уровень разрыва ($\epsilon_{пл} = 0,48\%$). Это приводит к появлению очень узкого участка, на котором велика ($P_{ор} = 78\%$) вероятность образования трещин.

Таким образом, расчеты продольных напряжений круглого слитка диаметром 140 мм позволяют определить вероятность образования деформационных дефектов,

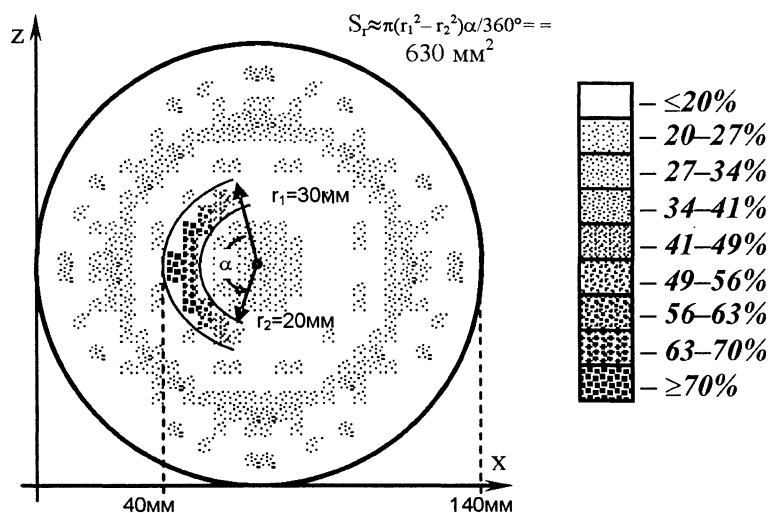


Рис. 8. Распределение вероятности образования поперечных трещин (выделенная площадь соответствует вероятности 20–70%) по поперечному сечению слитка (Ст20), движущегося со скоростью $v=2,2$ м/мин на расстоянии 16 м от уровня расплава

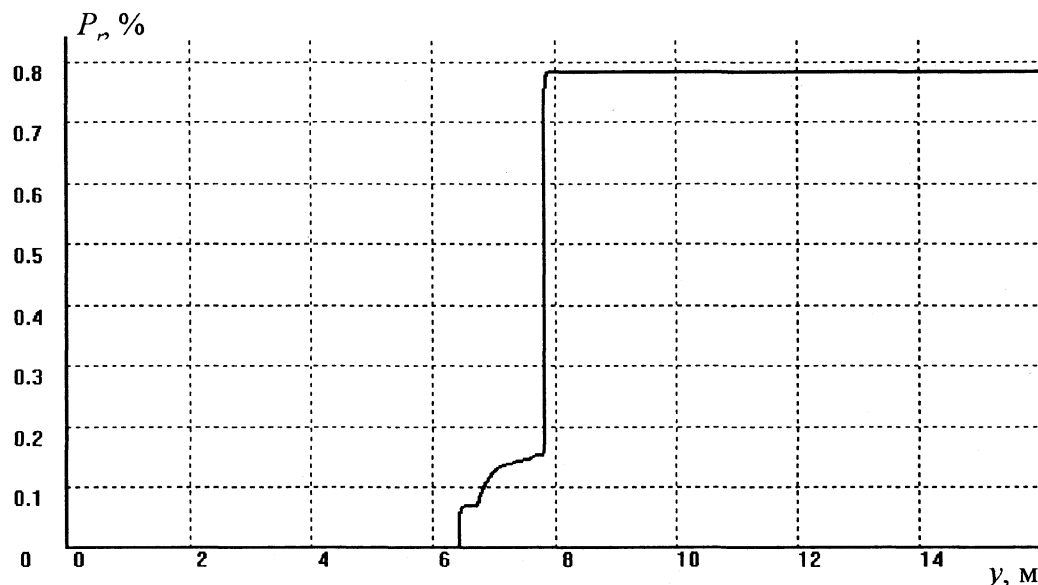


Рис. 9. Изменение вероятности образования разрыва (накопление дефектов) вдоль продольной линии с координатами ($x=42,5$ мм; $z=70$ мм) слитка, движущегося со скоростью $v=2,2$ м/мин

связанных с образованием поперечных трещин при разливке стали. Установлено, что в области разгиба слитка (5–8 м) возникает аномальный сдвиг механических напряжений, который может усиливаться термическими напряжениями и приводить к образованию трещин в различных сечениях слитка. Установлено, что повышение температур в области разгиба приводит к усилению эффекта образования трещин. Расчетами показано, что каждый слой слитка имеет свой интервал перехода сжимающих напряжений в растягивающие. Данные результаты используются для выбора технологических режимов получения круглого слитка диаметром 140 мм для различных скоростей разливки, которые минимизируют дефекты, связанные с процессами термоупругости, протекающими при кристаллизации металла.

Литература

1. Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка. М.: Металлургия, 1990.
2. Чичко А.Н., Маточкин В.А., Кукуй Д.М., Муриков М.А., Демин А.В. Моделирование упругопластических деформаций при разливке стали в слитки круглого сечения // *Литье и металлургия*. 2006. № 2. Ч.1. С. 35–38.
3. Чичко А.Н., Кукуй Д.М., Андрианов Н.В., Яцкевич Ю.В., Чичко О.И. Моделирование влияния охлаждаемых и неохлаждаемых роликов на температуры и напряжения поверхности промышленного слитка в зоне вторичного охлаждения // *Литье и металлургия*. 2003. №3. С. 131–138.
4. Чичко А.Н., Бороздин А.С. Трехмерное моделирование напряженного состояния движущегося слитка при изменении граничных условий по температуре // *Изв. вузов. Энергетика*. 2005. №4. С. 61–67.