

УДК 621.746+621.771

НАГРУЖЕННОСТЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БОЙКОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПОЛОСЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ. СООБЩЕНИЕ 2

Лехов О.С.¹, д.т.н., профессор кафедры автомобилей и подъемно-транспортных машин (MXLehov38@yandex.ru)

Михалев А.В.¹, старший преподаватель кафедры металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения

Шевелев М.М.², начальник лаборатории неразрушающего контроля

¹ **Российский государственный профессионально-педагогический университет**
(620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

² **ЗАО «Центр тепловизионной диагностики»**
(620057, Екатеринбург, ул. Таганская, 56)

Аннотация. Описаны основные нагрузки, действующие на стенки-бойки сборного кристаллизатора установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. Изложена методика определения суммарных напряжений в стенках-бойках установки от усилий обжатия и температурной нагрузки. Описаны температурные граничные условия для определения температурных полей в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки при получении листов из стали для сварных труб. Приведена зависимость для определения плотности теплового потока от горячего металла очага деформации, действующего на рабочую поверхность стенки-бойка при обжатии заготовки. Изложена методика определения значений эффективных коэффициентов теплоотдачи при охлаждении стенок-бойков водой. Описана процедура определения температурных полей и термоупругих напряжений на стенках-бойках установки с использованием пакета ANSYS. Описаны исходные данные для определения температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки. Результаты расчета температурных полей и термоупругих напряжений выполнены в пяти сечениях стенки-бойка и приведены для характерных линий. Показан характер распределения температуры по толщине стенки-бойка при охлаждении его водой на холостом ходу и контакте с заготовкой при ее обжатии. Для рассчитанных полей температур определены осевые и эквивалентные напряжения, возникающие в стенках-бойках без каналов при обжатии заготовки и охлаждении их водой во время холостого хода. Представлены величины и закономерности распределения осевых и эквивалентных напряжений по толщине приконтактного слоя и по высоте и толщине стенок-бойков при обжатии заготовки и на холостом ходу. Приведены величины и закономерности распределения суммарных осевых напряжений по толщине приконтактного слоя, высоте и толщине стенок-бойков от усилий обжатия и температурной нагрузки.

Ключевые слова: стенка-боек, кристаллизатор, установка, непрерывное литье, деформация, температура, напряжение, обжатие, усилие, труба.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-431-438

В предыдущей работе [1] представлены результаты определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации и напряжений в стенках-бойках установки от усилий обжатия.

Основными нагрузками, действующими на стенки-бойки, являются нагрузка от усилия обжатия и циклическая температурная нагрузка. С использованием аппарата линейной термической упругости компоненты тензора напряжений, возникающие в стенке-бойке, можно записать в виде суммы

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^p + \sigma_{ij}^t,$$

где σ_{ij}^p – напряжения от усилия обжатия; σ_{ij}^t – термоупругие напряжения от температурной нагрузки.

Для определения величины σ_{ij}^t следует сначала найти температурное поле, возникающее в стенках-бойках

при обжатии заготовок, затем по найденному полю температур определить термоупругие напряжения.

В соответствии с принятой конструкцией системы охлаждения стенок-бойков при обжатии заготовки действуют следующие температурные граничные условия: контакт с горячим металлом, нагрев излучением от горячего металла, а также водяное и воздушное охлаждение. Водяное охлаждение и излучение действуют в зоне очага циклической деформации заготовки. Температурное поле стенок-бойков определяется на основе решения сравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [2]. Среднюю плотность теплового потока от горячего металла очага деформации, действующую на рабочую поверхность стенки-бойка, определяем по формуле [3]

$$q_{cp} = \sqrt{\lambda C_V} \frac{2(\theta_3 - \theta_0)}{\sqrt{\pi \tau_1}}.$$

Для расчета принимаем следующие значения параметров, входящих в формулу: $\lambda = 40$ Вт/(м·К) – значение теплопроводности материала бойка; $C_V = 5$ МДж/(м³·К) – объемная теплоемкость (значение C_V для стали принято согласно данным работы [4]); $\theta_3 = 1000$ °С – температура металла очага деформации; $\theta_0 = 400$ °С – температура рабочей поверхности стенки-бойка в квазиустановившемся режиме при рабочем ходе; $\tau_1 = 0,1364$ с – время контакта стенки-бойка с металлом.

Принимаем расчетное значение плотности теплового потока $q_{cp} = 20$ МВт/(м²·К). Значение эффективного коэффициента теплоотдачи α_1 , принятого в граничных условиях на рабочую поверхность во время паузы, подбирали многочисленными итерационными расчетами из условия, чтобы в квазистационарном состоянии температура рабочей поверхности стенки-бойка была на уровне 400 °С. В результате принято $\alpha_1 = 50\,000$ Вт/(м²·К). Значение коэффициента теплоотдачи α_2 при охлаждении поверхностей стенки-бойка водой принимаем равным 500 Вт/(м²·°С) [5 – 8].

Таким образом, для определения термоупругих напряжений в стенке-бойке необходимо: в каждый момент времени определить температурное поле во всех узлах конечноэлементной сетки; затем для данного момента времени решить объемную задачу теории упругости. При этом в качестве граничных условий необходимо задать на всей поверхности стенки-бойка только отсутствие внешних сил. Тогда разрешающие уравнения [9, 10] позволят найти температурные перемещения во всех узлах конечноэлементного разбиения, а затем определяются температурные деформации и напряжения.

Такая схема выполнения расчетов с использованием метода конечных элементов повторяется и реализуется в одном из модулей пакета ANSYS 15 [11 – 15].

Материал стенки-бойка – сталь 45ХНМ. Теплофизические свойства для этой марки стали приведены в работе [16].

Принятые для расчета значения модуля упругости E , плотности ρ , теплопроводности λ , теплоемкости C , коэффициента линейного расширения α для стали 45ХНМ в интервале температур от 20 до 700 °С приведены ниже:

Значение параметра при температуре, °С								
20	100	200	300	400	500	600	700	
$E \cdot 10^{-5}$, МПа								
2,16	2,07	1,97	1,88	1,76	1,68	1,52	1,36	
$\rho \cdot 10^6$, кг/мм ³								
7,75	7,73	7,72	7,69	7,69	7,66	7,62	7,60	
$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(мм·°С)								
34	34	33	32	41	30	29	27	
C , Дж/(кг·°С)								
480	480	500	520	540	555	556	556	
$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹								
11,6	12,6	12,1	12,7	13,2	13,6	13,9	14,0	

При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

- на торце бойка, задней стенке, сверху и снизу бойка – охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи 500 Вт/(м²·К) и температурой окружающей среды 60 °С;

- на рабочую поверхность бойка во время рабочего хода в течение 0,1364 с действует тепловой поток плотностью 20 МВт/(м²·К);

- во время холостого хода (0,4092 с) эффективный коэффициент теплоотдачи равен 50 000 Вт/(м²·К).

Следует отметить, что для решения задачи нестационарной теплопроводности некоторые параметры, такие как, например плотность теплового потока от металла очага деформации, действующей на рабочую поверхность во время рабочего хода, а также эффективный коэффициент теплоотдачи, принятый на рабочую поверхность во время паузы, можно определить (и то приближенно) лишь путем численного моделирования процесса работы стенки-бойка с различными значениями параметров и сравнения этих результатов с экспериментальными данными. Однако для исследуемого процесса работы стенок-бойков отсутствуют какие-либо экспериментальные данные. Таким образом, температурные поля стенок-бойков и уровень возникающих в них термоупругих напряжений могут быть уточнены в последующем при получении экспериментальных данных на действующем оборудовании [17 – 20].

Расчет температур и затем термоупругих напряжений, как и в работе [1], выполнены в пяти сечениях, и результаты приведены для характерных линий (см. рис. 4, 5 Сообщения 1). На рис. 1 показан характер распределения температуры по толщине стенки-бойка без каналов при охлаждении водой на холостом ходу в течение 0,4092 с и контакте с заготовкой при ее обжатии в течение 0,1364 с. Во время холостого хода осуществляется охлаждение водой стенки-бойка с боковых поверхностей и суппорта. Распределение температуры приведено вдоль линии Р4, распределение температур по другим линиям такое же.

Из приведенных результатов следует, что температурное поле стенки- бойка во время обжатия заготовки и холостого хода изменяется на глубине 2 – 3 мм. От воздействия теплового потока во время обжатия заготовки контактная поверхность стенки-бойка нагревается до максимальной температуры 511 °С, и далее на холостом ходу при охлаждении его водой температура стенки-бойка на глубине 2 – 3 мм уменьшается до 135 – 150 °С. Температура стенки бойка по толщине уменьшается и на его задней поверхности составляет 75 – 100 °С.

Для рассчитанных полей температур были определены значения осевых термоупругих напряжений (SX , SY и SZ) и эквивалентных напряжений по Мизесу ($SEQV$), возникающих в стенках-бойках без каналов при обжатии заготовки и при охлаждении их водой во

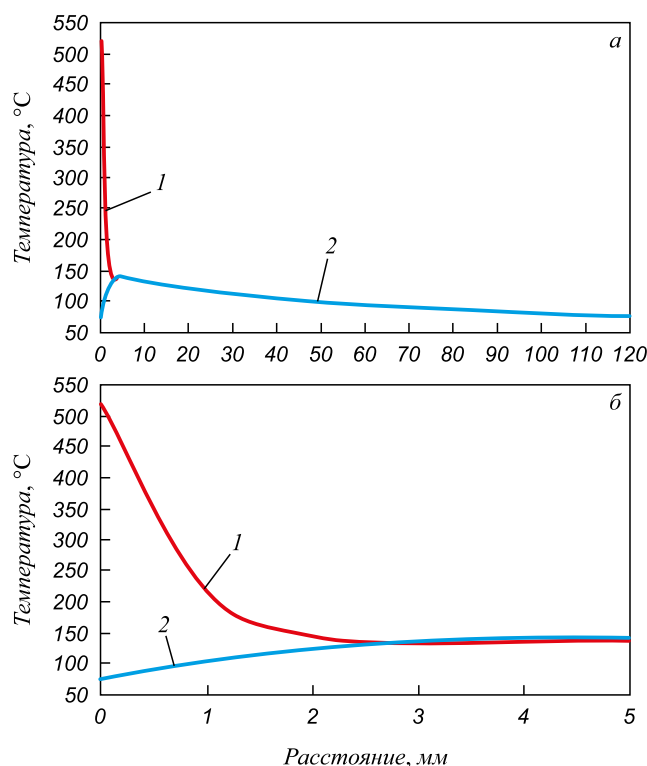


Рис. 1. Характер распределения температур вдоль линии P4 от воздействия на боек теплового потока (1) и охлаждения водой (2): а – по толщине бойка; б – от поверхности контакта вглубь на 5 мм

Fig. 1. Nature of the temperature distribution along the P4 line under the impact of heat flow (1) and water cooling on the backup (2): а – along the thickness of the backup; б – from the contact surface to 5 mm deep

время холостого хода. Результаты расчета осевых термоупругих напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу в приконтактном слое стенки-бойка без каналов приведены на рис. 2 и в табл. 1 и 2.

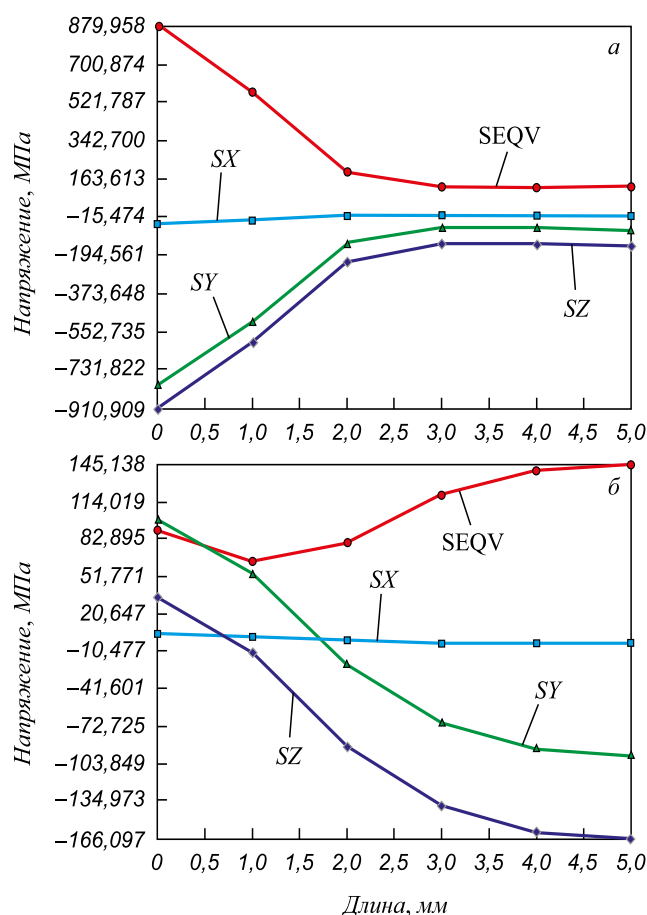


Рис. 2. Характер температурных напряжений вдоль линий P2 от воздействия на боек без каналов температурного поля. Охлаждение боковых поверхностей бойка и суппорта – водой: а – в конце контакта; б – в конце паузы

Fig. 2. Nature of the temperature stresses along the P2 lines under the temperature field impact on the backup without the channels. Cooling of the lateral surfaces of the backup and the support with water: а – at the end of the contact; б – at the end of a pause

Таблица 1

Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки

Table 1. Stress state of the contact layer of the backup-wall without channels during drafting of the workpiece

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС
1, линия P1	-48	-78	-255	91	-742	-115	646	130
2, линия P2	-45	-15	-831	-105	-910	-140	880	128
4, линия P3	-25	15	-730	-25	-870	-115	820	120
5, линия P4	-20	-30	-240	89	-702	-108	617	130
1, линия P5	-43	-40	-195	100	-648	-85	561	78
2, линия P6	-40	6	-790	-35	-790	6	803	105
4, линия P7	2	2	-740	0	-740	6	744	2
5, линия P8	-9	-74	-230	10	-607	-10	528	75

Примечание. КП – контактная поверхность стенки бойка с заготовкой; ПС – приконтактный слой стенки-бойка глубиной 5 мм.

Напряженное состояние приконтактного слоя стенки-бойка без каналов в конце холостого хода

Table 2. Stress state of the contact layer of the backup-wall without channels at the end of the idle move

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	SX		SY		SZ		SEQV	
	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС	КП	ПС
1, линия P1	5	28	44	-10	10	-120	52	124
2, линия P2	-5	-8	88	-85	35	-166	90	145
4, линия P3	0	-8	151	-40	55	-146	136	120
5, линия P4	2	26	37	-9	30	-90	38	110
1, линия P5	6	26	45	-12	92	-37	82	60
2, линия P6	3	-2	107	-87	156	-50	143	80
4, линия P7	0	-5	148	-48	168	-44	160	40
5, линия P8	1	28	39	-10	117	-20	103	45

Эти данные характеризуют закономерности распределения осевых термоупругих и эквивалентных напряжений по толщине приконтактного слоя, а также по высоте и ширине стенки-бойка без каналов при обжатии заготовки и на холостом ходу. Представленные результаты свидетельствуют о том, что в зоне контакта стенки-бойка с заготовкой от воздействия температурной нагрузки в приконтактном слое стенки-бойка возникают сжимающие напряжения, имеющие максимальные значения на контактной поверхности. Затем сжимающие термоупругие напряжения снижаются и достигают минимальных значений на глубине приконтактного слоя 2 мм (рис. 2, табл. 1). Максимальные термоупругие напряжения возникают вдоль осей Y и Z и достигают значений $-740 \div 910$ МПа. Затем по толщине приконтактного слоя эти напряжения снижаются и на глубине 2 мм они становятся равными $-108 \div 140$ МПа. Напряжение по Мизесу по высоте стенки-бойка без каналов распределяется неравномерно и изменяется в диапазоне 528 – 880 МПа.

Так же важно оценить закономерности распределения осевых термоупругих напряжений в приконтактном слое стенок-бойков без каналов при охлаждении их водой на холостом ходу. Из рис. 2 и табл. 2 видно, что термоупругие напряжения распределяются по толщине приконтактного слоя стенок-бойков крайне неравномерно; имеют место как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Наибольшие растягивающие напряжения (до 168 МПа) возникают в направлении осей Y и Z на контактной поверхности стенки-бойка с заготовкой, затем по толщине стенки-бойка они переходят в сжимающие (табл. 2).

Для определения напряженного состояния стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия и температурной нагрузки проведены специальные расчеты. На рис. 3 показаны закономерности распределения осевых суммарных напряжений в стенках-бойках

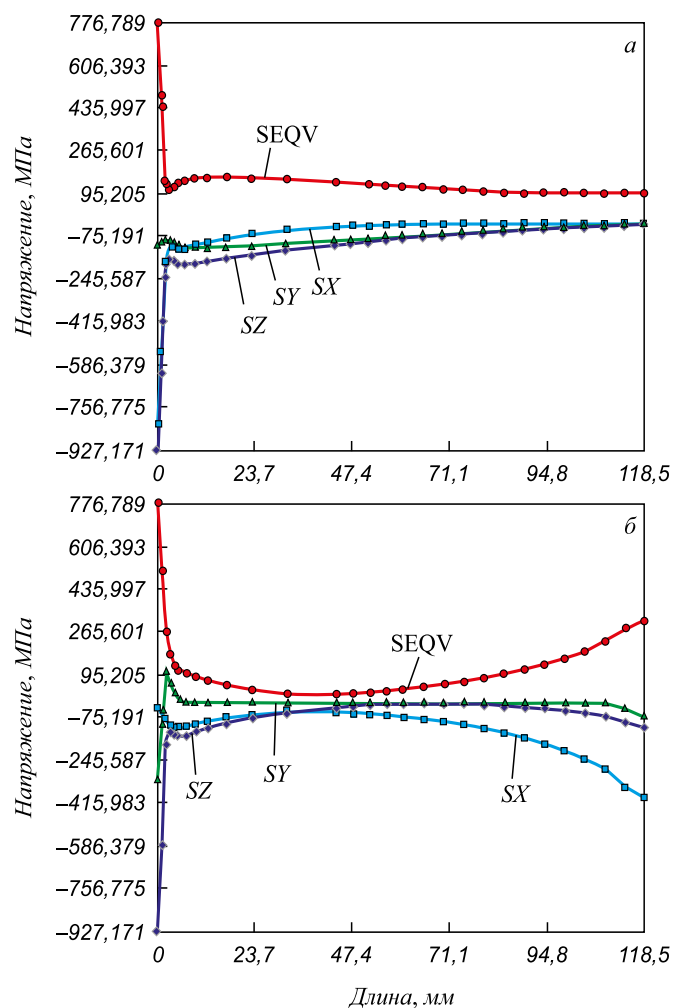


Рис. 3. Характер суммарных напряжений вдоль линий P3 (а) и P4 (б) от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

Fig. 3. Nature of the total stresses along the P3 (a) and P4 (b) lines under the impact the temperature field generated by contact and drafting forces on the backup without channels during the operating cycle

от усилия обжатия и температурной нагрузки по толщине и высоте стенки-бойка без каналов.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что в зоне контакта стенки-бойка с заготовкой имеют место сжимающие напряжения, причем наибольшей величины они достигают на контактной поверхности, а затем по толщине стенки-бойка уменьшаются (рис. 3, табл. 3 и 4).

Так, суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки в направлении осей *Y* и *Z* в сечении 3 достигают соответственно максимальных значений (–980 и –1033 МПа). В других сечениях осевые суммарные напряжения меньше и в направлении осей

Y и *Z* они изменяются соответственно в диапазонах –235 ÷ –820 МПа и –436 ÷ –600 МПа (табл. 3).

Рис. 4 характеризует распределение суммарных напряжений в приконтактном слое стенки-бойка без каналов по его высоте.

Наибольших значений суммарные напряжения достигают на контактной поверхности стенки-бойка при обжатии заготовки и их максимумы в направлении осей *X*, *Y* и *Z* соответственно составляют –319, –935 и –1033 МПа. Однако в приконтактном слое стенки-бойка на глубине 5 мм эти напряжения значительно меньше и в направлении осей *X*, *Y* и *Z* их значения составляют –263, –169 и –245 МПа (рис. 4).

Таблица 3

Напряженное состояние стенки-бойка без каналов от воздействия усилия обжатия и температурной нагрузки

Table 3. Stress state of the backup-wall without channels after the impact of drafting force and the temperature load

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	<i>SX</i>		<i>SY</i>		<i>SZ</i>		<i>SEQV</i>	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
1, линия P1	–48	–300	–255	–75	–637	–94	645	229
2, линия P2	–24	24	–637	0	–600	0	690	110
4, линия P3	–120	–35	–756	–20	–590	–20	606	95
5, линия P4	–42	–304	–238	–42	–570	–75	546	263
1, линия P5	–43	–220	–285	–43	–557	–73	562	199
2, линия P6	–39	–6	–756	–23	–603	–20	620	82
3, линия P7	–113	–63	–820	–27	–567	–63	592	120
4, линия P8	–39	–265	–235	–39	–436	–65	494	358

Примечание. ТС – распределение напряжений по толщине стенки-бойка.

Таблица 4

Распределение осевых напряжений от усилий обжатия и температурной нагрузки по толщине приконтактного слоя, высоте и ширине стенки-бойка без каналов

Table 4. Distribution of axial stresses from the drafting forces and temperature load along the thickness of the contact layer, the height and width of the backup-wall without channels

Номер сечения, линия	Напряжение, МПа							
	<i>SX</i>		<i>SY</i>		<i>SZ</i>		<i>SEQV</i>	
	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС	КП	ТС
Линия P9	–76	–319/–372	–272	–935/–272	–750	–1030/–672	679	869
Линия P10	–80	–263/–90	–10	–169/79	–128	–245/–100	121	121
2, линия P11	–50	–50	–765	–607	–898	–246	856	510
2, линия P12	–11	–11	–71	–37	–143	95	121	108
4, линия P13	–117	–117	–836	–670	–927	–245	776	608
4, линия P14	–100	–183	–120	–120	–183	20	160	231
3, линия P15	–324	–324	–980	–30	–724	–30	560	90
3, линия P16	–324	–324	–980	–768	–1033	–320	738	561
Линия P17	–57	–320/8	–263	–967/–263	–620	–870/–615	560	792

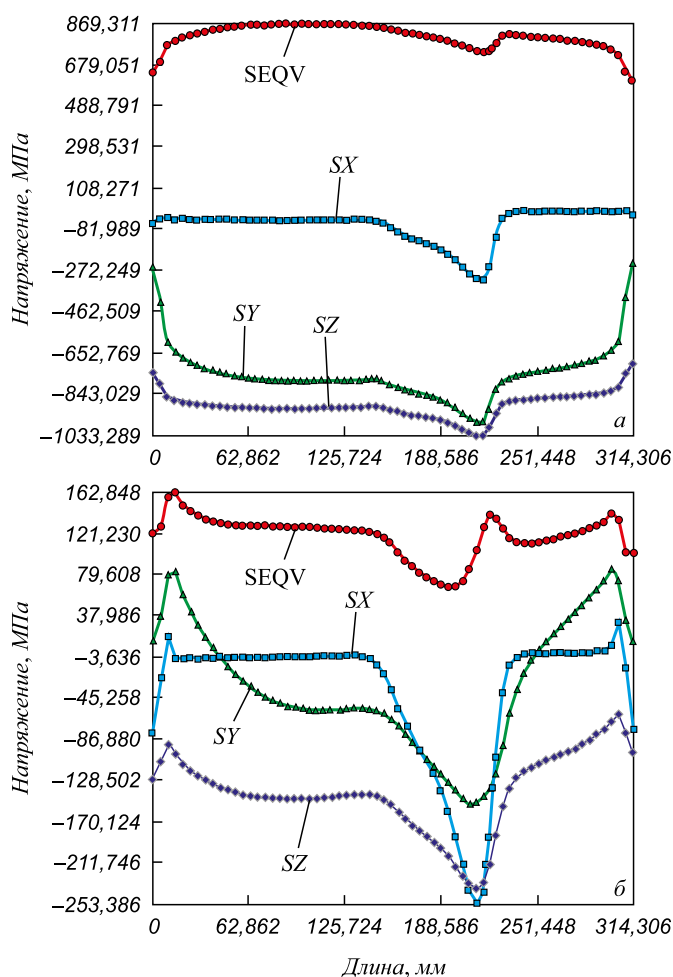


Рис. 4. Характер суммарных напряжений вдоль линий P9 (а) и P10 (б) от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

Fig. 4. Nature of the total stresses along the P9 (a) and P10 (b) lines under the impact of the temperature field arising at contact and drafting forces on the backup without channels during the operating cycle

На рис. 5 и в табл. 4 показан характер распределения по ширине стенки-бойка суммарных напряжений в приконтактном слое стенки-бойка в сечениях 2 и 4 (см. рис. 4 сообщения 1). Максимальные значения суммарных напряжений имеют место на контактной поверхности и в направлении осей X и Z они достигают значений -836 и -927 МПа, соответственно.

Распределение осевых суммарных напряжений на контактной поверхности стенок-бойков по их высоте показано на рис. 5.

Максимальные значения напряжения в направлении осей X, Y и Z достигают при обжатии заготовки (соответственно -320 , -967 и -870 МПа).

Выводы. Поставлена и решена задача определения температурных полей и термоупругих напряжений в стенках-бойках сборного кристаллизатора установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. Определены значения и закономерности распределения температуры и термо-

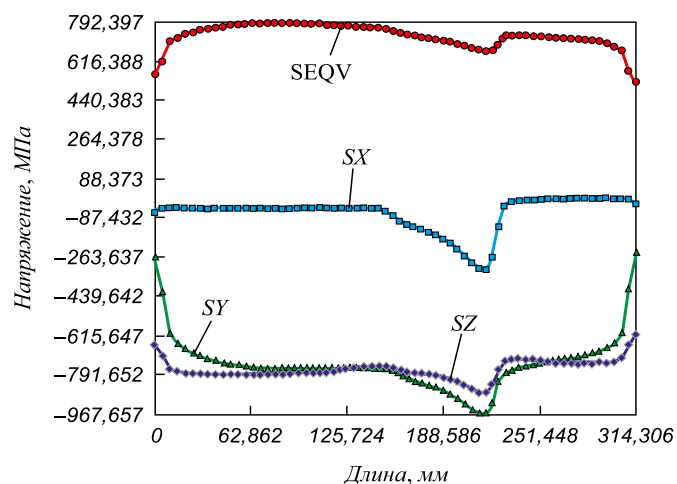


Рис. 5. Характер распределения суммарных напряжений вдоль линий P17 от воздействия на боек без каналов температурного поля, возникающего при контакте, и усилия обжатия при рабочем ходе

Fig. 5. Nature of distribution of the total stresses along the P17 lines under the impact of the temperature field generated by contact and drafting forces on the backup without channels during the operating cycle

упругих напряжений в стенках-бойках установки. Установлены закономерности распределения в стенках-бойках суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полоса при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. № 4. С. 268 – 273.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа. 1967. – 600 с.
3. Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А.Г., Негров Д.А. Технологические процессы в машиностроении. Ч. II. Обработка металлов давлением и сварочное производство. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 200 с.
4. Буланов Л.В., Карлинский С.Е., Волегова В.Е. Долговечность роликов МНЛЗ при наружном и внутреннем охлаждении. – В кн.: Надежность крупных машин. Сб. науч. тр. НИИтяжмаш. – Свердловск: изд. НИИтяжмаш, 1990. С. 126 – 132.
5. Хлопонин В.Н., Косырева М.В., Косяк А.С. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя вала. – В кн.: Труды МИСиС. – М.: изд. МИСиС, 1977. № 100. С. 90 – 93.
6. Астахов И.Г., Белосевич В.К., Ионов С.М., Лебедев Л.С. Определение коэффициента теплоотдачи прокатных валков при охлаждении водой. – В кн.: Труды МИСиС. – М.: изд. МИСиС, 1977. № 102. С. 4 – 9.
7. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Шаравин М.П., Надутов В.Г. Новый метод расчета конвективного теплообмена валков листовых станов // Производство толстолистовой стали. 1981. № 5. С. 54 – 57.
8. Астахов А.А., Мазур И.П. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. № 112. Т. 7. С. 83 – 86.
9. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волоснякова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы валки – полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 12. С. 15 – 19
11. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0. <http://www.cadferm.ru>
12. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 393 с.
13. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
14. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 432 с.
15. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
16. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
17. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2009. – 411 с.
18. Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет. – Екатеринбург: изд. УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – 112 с.
19. Лехов О.С., Гузанов Б.Н., Лисин И.В., Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали // Сталь. 2016. № 1. С. 59 – 62.
20. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1976. – 349 с.

Поступила 12 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 6, pp. 431–438.

LOAD AND STRAIN STATUS OF CCM BACKUPS AND STRIPE DEFORMATION AT PRODUCTION OF STEEL SHEETS FOR WELDED PIPES. REPORT 2

O.S. Lekhov¹, A.V. Mikhalev¹, M.M. Shevelev²

¹Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

²JSC “Center of Thermal Imaging Diagnostics”, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The main loads acting on the backup-walls of the assembled mold of the combined continuous casting and deformation unit in production of steel sheets for welded pipes are described. The technique for determining the total stresses in backup-walls of the installation of the compression forces and the temperature load is given. The temperature boundary conditions for determining the temperature fields in the backup-walls of the assembled mold of the unit for steel sheets for welded pipes production are depicted. The dependence for determining the heat flux density of the deformation center hot metal influencing working surface of the backup-wall during workpiece drafting is considered, as well as the technique for determining values of effective heat transfer coefficients for backup-walls cooling by water. The procedure for determining temperature fields and thermoelastic stresses on backup-walls of the installation is described using the ANSYS package. The article considers the initial data for determining temperature fields and thermoelastic stresses in backup-walls of the assembled casting mold of the installation. The results of temperature fields and thermoelastic stresses calculation are achieved in five sections of the backup-wall and are provided for the typical lines. The nature of temperature distribution along the backup-wall thickness during cooling by water at idle and at contact with the workpiece during its compression is shown. For the calculated temperature fields, axial and equivalent stresses, that arise in the backup-walls without channels when the workpiece is drafted and cooled with water at idle, are determined. The values and regularities of distribution of axial and equivalent stresses along the thickness of the contact layer and along the height and thickness of the backup-walls during drafting of the workpiece and at idle are presented. The values and regularities of the distribution of total axial stresses along the thickness of the contact layer, the height and thickness of the backup-walls from the drafting forces and the temperature load are given.

Keywords: backup-wall, casting mold, installation, continuous casting, deformation, temperature, stress, drafting, force, pipe.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-431-438

REFERENCES

1. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Shevelev M.M. Load and strain status of CCM backups and stripe deformation at production of steel sheets

for welded pipes. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, no. 4, pp. 268–273. (In Russ.).

2. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
3. Kushner V.S., Vereshchaka A.S., Skhirtladze A.G., Negrov D.A. *Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii. Ch. II. Obrabotka metallov davleniem i svarochnoe proizvodstvo* [Technological processes in mechanical engineering. Part. II. Metal forming and welding]. Omsk: OmGTU, 2005, 200 p. (In Russ.).
4. Bulanov L.V., Karlinskii S.E., Volegova V.E. Durability of CCM rollers at external and internal cooling. In: *Nadezhnost' krupnykh mashin. Sb. nauch. tr. NIItzashmash*. Sverdlovsk: NIItzashmash, 1990, pp. 126–132. (In Russ.).
5. Khloponin V.N., Kosyreva M.V., Kosyak A.S. Effect of the cooling system on thermal conditions of the roll's surface layer. In: *Trudy MISiS*. Moscow: MISiS, 1977, no. 100, pp. 90–93. (In Russ.).
6. Astakhov I.G., Belosevich V.K., Ionov S.M., Lebedev L.S. Determination of the heat transfer coefficient of milling rolls with water cooling. In: *Trudy MISiS*. Moscow: MISiS, 1977, no. 102, pp. 4–9. (In Russ.).
7. Garber E.A., Goncharskii A.A., Sharavin M.P., Nadutov V.G. New method for calculating convective heat transfer of rolls of sheet mills. *Proizvodstvo tolstolistovoi stali*. 1981, no. 5, pp. 54–57. (In Russ.).
8. Astakhov A.A., Mazur I.P. Development of a model for studying the thermal state of working rolls of hot rolling mills. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, no. 112, vol. 7, pp. 83–86. (In Russ.).
9. Sorokin V.G., Volosnyakova A.V., Vyatkin S.A. etc. *Marochnik stali i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).
10. Lekhov O.S. Study of stress-strain state of the rolls during rolling of band-beam in the stands of universal beam mill. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 12, pp. 15–19. (In Russ.).
11. ANSYS. *Structural Analysis Guide. Rel. 15.0*. Available at URL: <http://www.cadferm.ru>
12. Segerlind Larry J. *Applied finite element analysis*. New York etc., 1976. (Russ.ed.: Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1979, 393 p.).
13. Norrie D. H., de Vries G. *An introduction to finite element analysis*. Academic Press, New York, 1978. (Russ.ed.: Norrie D., de Vries G. *Vvedenie v metod konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1981, 304 p.).

14. Gallagher R.H. *Finite Element Analysis: Fundamentals*. Prentice-Hall, New Jersey, 1975, 420 p. (Russ.ed.: Gallagher R. *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Moscow: Mir, 1984.).
15. Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Finite Elements and Approximation*. New York: Wiley, 1983, 328 p. (Russ.ed.: Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Konechnye elementy i approksimatsiya*. Moscow: Mir, 1986, 318 p.).
16. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of the deformable solid]. Moscow: Nauka, 1979, 744 p. (In Russ.).
17. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennye protsessy nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined processes of continuous casting and deformation for rolling stock production]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2009, 411 p. (In Russ.).
18. Lekhov O.S., Turlaev V.V., Lisin I.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesssa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii. Teoriya i raschet* [Installation of combined process of continuous casting and deformation. Theory and design]. Ekaterinburg: URFU, 2014, 112 p. (In Russ.).
19. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Lisin I.V., Bilalov D.Kh. Investigation of the combined process of continuous casting and cyclic deformation for production of steel sheets. *Stal'*. 2016, no. 1, pp. 59–62. (In Russ.).
20. Boley Bruno A., Weiner Jerome H. *Theory of Thermal Stresses*. New York: John Wiley & Sons, 1960. (Russ.ed.: Boley B., Weiner J. *Teoriya temperaturnykh napryazhenii*. Moscow: Mir, 1964, 517 p.).

Information about the authors:

O.S. Lekhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Cars and Industrial Machines (MXLehov38@yandex.ru)

A.V. Mikhalev, Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy, Welding Production and Methods of Vocational Training

M.M. Shevelev, Head of Nondestructive Testing Laboratory

Received July 12, 2017