

УДК 669.141.246:621.774.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В БОЙКАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТОВ ИЗ СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ ТРУБ

*Лехов О.С.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения  
в машиностроении и металлургии (MXLehov38@yandex.ru)*

*Михалев А.В.<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры металлургии, сварочного производства  
и методики профессионального обучения*

*Шевелев М.М.<sup>2</sup>, начальник лаборатории неразрушающего контроля*

<sup>1</sup> Российский государственный профессионально-педагогический университет

(620012, Россия, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

<sup>2</sup> ЗАО «Центр тепловизионной диагностики»

(620057, Россия, Екатеринбург, ул. Таганская, 56)

**Аннотация.** Проведена сравнительная оценка напряженного состояния бойков с каналами и без них установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. Изложены условия эксплуатации и нагруженность бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. Дано конструктивное исполнение бойка с каналами для охлаждения водой и характер его нагружения. С использованием алгоритма решения задач теории упругости методом конечных элементов определены закономерности распределения осевых напряжений в бойках от усилия обжатия сляба. Проведена оценка влияния каналов для охлаждения бойков водой на величину и характер распределения в них напряжений от усилия обжатия сляба. Приведены результаты расчета температурных полей, осевых и эквивалентных термоупругих напряжений в бойках с каналами при получении листов из стали для сварных труб на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Кроме того, определены закономерности распределения суммарных напряжений в бойках с каналами. Для оценки влияния конструкции бойков на их напряженное состояние определены закономерности распределения термоупругих и суммарных напряжений в бойках без каналов. Приведен график зависимости термоупругих напряжений в бойке от температуры его контактной поверхности при получении листов из стали для сварных труб на установке. Даны рекомендации для выбора материала бойков. Изложены достоинства и недостатки бойков с каналами установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Представлены параметры опытной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения стальных полос. Приведены результаты экспериментального исследования параметров совмещенного процесса на опытной установке непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод».

**Ключевые слова:** установка, бойки, совмещенный процесс, непрерывное литье, деформация, напряжение, усилие обжатия, температура, плотность теплового потока, метод конечных элементов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-270-275

### ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития металлургического производства все большее распространение получают совмещенные процессы непрерывного литья и деформации, которые позволяют существенно снизить энергоемкость технологических процессов, металлоемкость оборудования, капитальные и эксплуатационные затраты [1 – 10].

### РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БОЙКОВ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

Разработана установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая может быть эффективно использована для производства листов из

стали для сварных труб [11, 12]. Бойки такой установки одновременно воспринимают усилия обжатия и температурную нагрузку. В результате интенсификации производства стальных листов для сварных труб и повышения требований к механическим свойствам и состоянию их поверхности возрастает нагруженность бойков установки. Таким образом, актуальной задачей является обоснованный выбор конструктивных параметров и материала бойков, обеспечивающих не только износостойкие свойства, но и способность противостоять циклическим нагрузкам при воздействии термоупругих и механических напряжений.

При разработке конструкции и выборе материала бойков важно учитывать их нагруженность, что позволит определить напряженное состояние бойков от усилия обжатия и температурной нагрузки при получении

листов для сварных труб. Причем эти расчеты следует выполнить для бойков различного конструктивного исполнения, что позволит более обоснованно выбрать конструктивные параметры и материал бойков с целью повышения их стойкости. Для сравнительной оценки напряженного состояния бойков различной конструкции рассмотрены два вида их конструктивного исполнения: с каналами для их охлаждения и без каналов.

Конструктивное исполнение бойка с каналами и характер его нагружения при получении листов толщиной 3 мм и шириной 2250 мм из стали 09Г2С на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации дано на рис. 1.

Материал бойка – сталь 45ХНМ. Толщина бойка по верхней поверхности 70 мм, длина 570 мм. Угол наклона рабочей поверхности бойка 12,5 градусов. Диаметр вертикальных каналов для охлаждения водой бойка 20 мм.

### РАСЧЕТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе расчета следует определить величины и закономерности распределения осевых напряжений от усилия обжатия в бойках с каналами и оценить влияние каналов на их напряженное состояние. Для определения напряжений в бойках от усилия обжатия использован алгоритм решения краевых задач теории упругости методом конечных элементов в объемной

постановке с использованием пакета ANSYS [11 – 19]. Результаты расчета осевых напряжений в бойках с каналами приведены в таблице.

Следует отметить, что осевые напряжения в бойках с каналами от усилия обжатия распределяются по толщине и длине бойка крайне неравномерно, причем имеют место как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Сжимающие напряжения на контактной поверхности бойка в направлении осей  $Y$  и  $Z$ , равные соответственно  $-210$  и  $-100$  МПа, переходят в области канала в растягивающие величиной  $120$  и  $140$  МПа (см. таблицу). Наибольшие растягивающие напряжения наблюдаются в области каналов бойков, причем максимальной величины они достигают в направлении осей  $Y$  и  $Z$  и составляют  $120 - 140$  МПа.

На втором этапе расчета следует определить температурные поля и осевые термоупругие напряжения в бойках с каналами. При расчете температурного поля приняты следующие граничные условия:

- на рабочую поверхность бойка с каналами во время обжатия заготовки в течение  $0,1364$  с действует плотность теплового потока  $q = 20$  МВт/(м<sup>2</sup>·К);
- в каналах осуществляется охлаждение водой с коэффициентом теплоотдачи  $7000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и с температурой воды  $35$  °С.

Для определения температурных полей и термоупругих напряжений в бойке использован алгоритм, изложенный в работе [20]. Результаты расчета приведены на рис. 2 и в таблице. Во время обжатия заготовки контактная поверхность бойка нагревается до температуры  $380 - 400$  °С и далее на холостом ходу на глубине  $2 - 3$  мм уменьшается до  $170 - 200$  °С. Для рассчитанных полей температур были определены величины и закономерности распределения осевых и эквивалентных термоупругих напряжений в бойках с каналами при обжатии заготовки (см. рис. 2, таблицу).

На контактной поверхности возникают высокие сжимающие термоупругие напряжения, достигающие  $-730$  МПа, которые в области каналов переходят в растягивающие величиной от  $-110$  до  $-140$  МПа (см. таблицу). Представляет интерес распределение в бойках осевых суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки. Сжимающее суммарное напряжение на контактной поверхности бойка в направлении оси  $X$ , равное  $-280$  МПа, в области канала повышается до  $-530$  МПа, а наибольшие суммарные напряжения на контактной поверхности бойка в направлении осей  $Y$  и  $Z$ , соответственно равные  $-670$  и  $-780$  МПа, в области канала переходят в растягивающие соответственно величиной  $180$  и  $220$  МПа (см. таблицу).

Таким образом, каналы для охлаждения бойков не только приводят к возникновению в области канала высоких растягивающих напряжений (до  $240$  МПа), но и существенно повышают уровень сжимающих суммарных напряжений – до  $-840$  МПа.

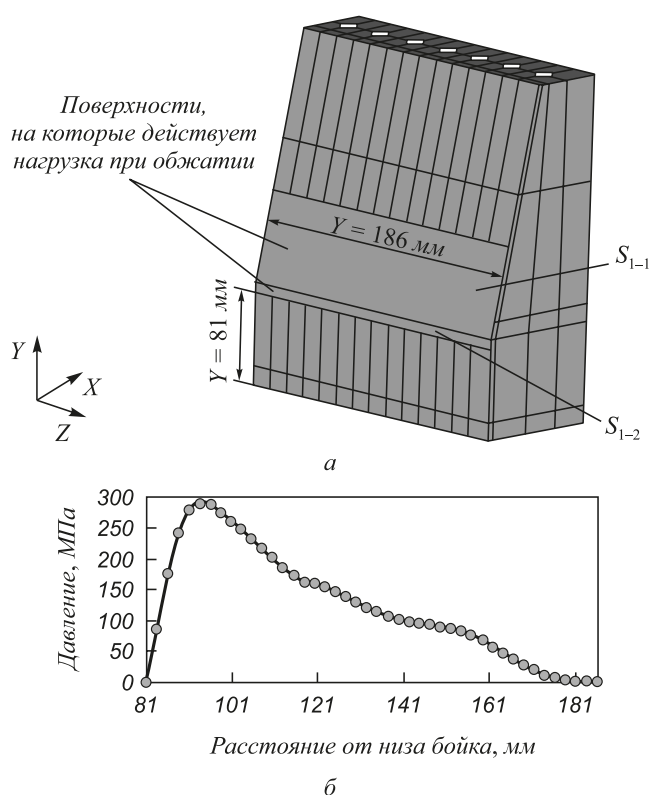


Рис. 1. Геометрия бойка (а) и характер его нагружения (б)

Fig. 1. Anvil geometry (a) and nature of its loading (b)

**Напряженное состояние бойков различной конструкции при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации**

**Stress state of anvils of various designs when producing steel sheets for welded pipes at continuous casting and deformation plant**

Температура контактной поверхности бойка, °С	Напряжения от усилия обжатия, МПа						Термоупругие напряжения, МПа						Суммарные напряжения, МПа					
	SX		SY		SZ		SX		SY		SZ		SX		SY		SZ	
	КП	ОК	КП	ОК	КП	ОК	КП	ОК	КП	ОК	КП	ОК	КП	ОК	КП	ОК	КП	ОК
Боек с каналами, $q = 20 \text{ МВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$																		
380 – 400	-200	-300	-210	120	-100	140	-50	-530	-600	110	-730	140	-280	-840	-670	180	-780	220
Боек без каналов, $q = 20 \text{ МВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$																		
510 – 535	-275	-	-233	-	-115	-	-50	-	-831	-	-910	-	-324	-	-967	-	-1033	-
Боек без каналов, $q = 10 \text{ МВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$																		
310 – 320	-275	-	-233	-	-115	-	-39	-	-410	-	-486	-	-297	-	-592	-	-615	-

Примечание. КП – контактная поверхность стенки бойка с заготовкой; ОК – область канала.

Для оценки влияния конструкции бойков на их напряженное состояние проведены расчеты осевых напряжений, возникающих в бойках без каналов установки при получении листов из стали для сварных труб. В связи с тем, что на температуру рабочей поверхности бойков оказывают влияние плотность теплового потока при обжатии сляба и эффективный коэффициент теплоотдачи во время холостого хода и эти параметры можно определить лишь приближенно путем численного моделирования, расчеты проведены для двух вариантов граничных условий. Для первого варианта расчета температурных полей плотность теплового потока принята равной  $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , а эффективный коэффициент теплоотдачи –  $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  (верхняя оценка температурных полей и термоупругих напряжений), а для второго

варианта плотность теплового потока уменьшена в два раза (нижняя оценка).

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТОВ**

Как показали результаты расчета, по первому варианту температура контактной поверхности бойка без каналов составила  $510 - 535 \text{ }^\circ\text{C}$ , а по второму варианту снизилась до  $310 - 320 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. таблицу).

Повышение температуры контактной поверхности бойков без каналов до  $510 - 535 \text{ }^\circ\text{C}$  привело к возникновению высоких осевых термоупругих напряжений на контактной поверхности в направлении осей Y и Z соответственно величиной  $-831 \text{ МПа}$  и  $-910 \text{ МПа}$ , а суммарных напряжений  $-967 \text{ МПа}$  и  $-1033 \text{ МПа}$  (верхняя оценка).

По второму варианту расчета бойков без каналов снижение температуры их контактных поверхностей до  $310 - 320 \text{ }^\circ\text{C}$  привело к снижению максимальных осевых сжимающих термоупругих напряжений в направлении осей Y и Z соответственно до  $-410$  и  $-486 \text{ МПа}$ , а суммарных напряжений – до  $-592$  и  $-615 \text{ МПа}$  (см. таблицу).

Графики зависимости осевых сжимающих термоупругих напряжений в бойках от температуры контактной поверхности приведены на рис. 3. Графики позволяют по экспериментально замеренным температурам контактных поверхностей бойков опытно-промышленной установки при обжатии сляба оценить уровень термоупругих напряжений и более обоснованно выбирать материал бойков с целью повышения их стойкости.

Анализ напряженного состояния системы бойки – полоса при получении листов из стали для сварных труб показал, что для повышения стойкости бойков температура их контактных поверхностей не должна превышать  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ . В этом случае эквивалентное напря-

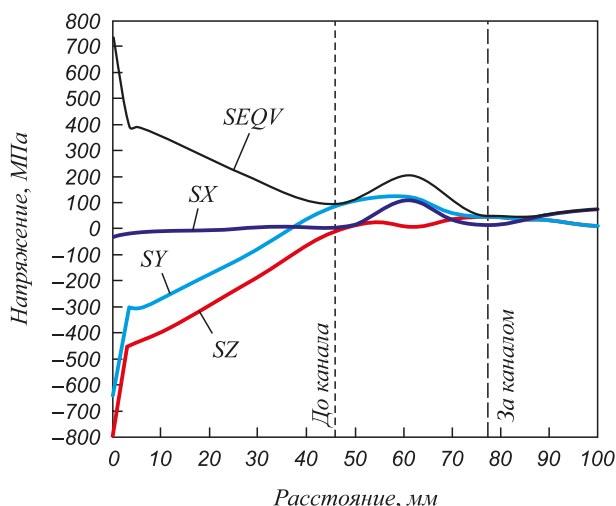


Рис. 2. Характер термоупругих напряжений от воздействия на боек температурного поля при контакте

Fig. 2. Nature of thermoelastic stresses in anvil under impact of temperature field during contact

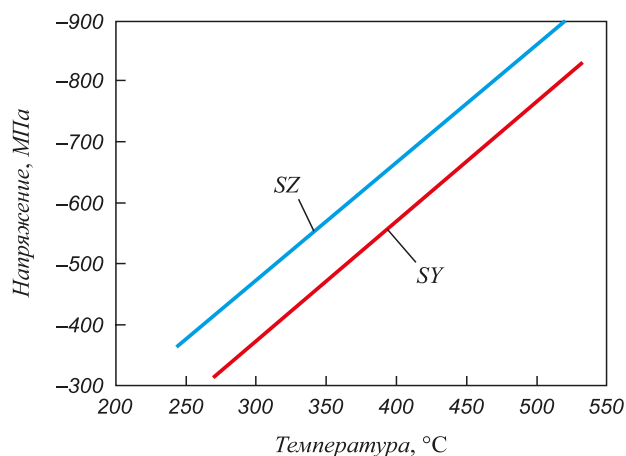


Рис. 3. Зависимость осевых сжимающих термоупругих напряжений в бойках без каналов от температуры контактной поверхности при обжатии сляба

Fig. 3. Dependence of axial compressive thermoelastic stresses in anvils without channels on temperature of contact surface during slab compression

жение по Мизесу будет не более 650 МПа и в качестве материала бойков целесообразно использовать сталь 150 ХНМ, у которой при температуре 300 – 400 °С предел текучести равен 640 – 620 МПа. Также необходимо выбрать систему охлаждения бойков во время холостых ходов, чтобы температура их контактных поверхностей не превышала 350 °С.

Сравнительный анализ напряженного состояния бойков с каналами и без них показал, что каналы являются концентраторами напряжений, поскольку они в области каналов повышают уровень осевых сжимающих напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки, а также приводят к возникновению осевых растягивающих термоупругих напряжений. С другой стороны, каналы в бойках позволяют снизить на 130 °С температуры их контактной поверхности в сравнении с бойками без каналов и, соответственно, снизить максимальные термоупругие напряжения с –910 до –730 МПа, а максимальные осевые суммарные напряжения с –1033 до –780 МПа.

#### ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для оценки результатов теоретических исследований и основных параметров промышленной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации была спроектирована, изготовлена и установлена на ОАО «Уральский трубный завод» опытная установка для получения полос толщиной 3 – 22 мм и шириной 220 мм из стали для сварных труб [11].

Сечение полости нового медного кристаллизатора 60×180 мм, боковые стенки выполнены полукруглыми с радиусом 30 мм, высота полости 800 мм. Бойки выполнены без каналов для их охлаждения. Угловая скорость вращения эксцентриковых валов 110 мин. Ско-

рость вытягивания сляба из кристаллизатора 2,5 м/мин. Мощность приводного электродвигателя 200 кВт. Экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на опытной установке при получении стальных полос позволило оценить конструктивные, технологические, скоростные и энергосиловые параметры установки, определить температуру сляба, получаемого листа и бойков. Толщина тонкого сляба перед обжатием бойками 30 – 40 мм. Температура стальной оболочки, выходящей из кристаллизатора, находилась в диапазоне 1200 – 1270 °С. Скорость вытягивания сляба из кристаллизатора 1,5 – 2,5 м/мин. Температура контактной поверхности бойков после обжатия сляба составила 300 °С. Эта величина соответствует температуре, полученной при расчете температурных полей и термоупругих напряжений в бойках без каналов установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

#### Выводы

Проведен сравнительный анализ напряженного состояния бойков различного конструктивного исполнения при получении на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации листов из стали для сварных труб. Определены величины и закономерности распределения в бойках с каналами и без них суммарных напряжений от усилия обжатия и температурной нагрузки. Получена зависимость осевых сжимающих термоупругих напряжений в бойках от температуры их контактной поверхности. Разработана и освоена опытная установка непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2009. – 411 с.
2. Вюнненберг К. Производство непрерывнолитых заготовок, отвечающих высшим требованиям качества. – В кн.: Труды шестого Международного конгресса железа и стали. Т. 3. – М.: Машиностроение, 1990. С. 364 – 376.
3. Кох Г., Копп Р. Прогресс в области деформаций с большими обжатиями // Черные металлы. 1979. № 21. С. 3 – 11.
4. Ямада К., Ватанабе Т., Абе К., Функда Т. Непрерывная разливка заготовок малого сечения // Черные металлы. 1981. № 10. С. 18 – 23.
5. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ». – В кн.: Металлургическое производство и технология металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1990. С. 46 – 56.
6. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs // Tetsu to Hagane. 1977. Vol. 63. No. 8. P. 1297 – 1304.
7. Печке Ю., Ноймнетц Д. Способы непрерывного литья, совмещенного с прокаткой // Черные металлы. 1981. № 22. С. 9 – 13.
8. Fujii H., Ohashi T., Hiramoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs // Transact. Iron and Steel Inst. Japan. 1978. Vol. 18. No. 8. P. 510 – 518.

9. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. – In: Applied Mathematical, and Physical Models in Iron and Steel Industry Proceedings of the 3rd Process Technological. Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982. – New York, 1982. P. 264 – 270.
10. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М.: Metallurgizdat, 2012. – 696 с.
11. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. – Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ, 2017. – 151 с.
12. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы вальки – полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 10. С. 37 – 41.
13. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
14. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. – М.: Мир, 1984. – 432 с.
15. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 12.0. <http://www.cadfern.ru>.
16. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
17. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
18. Мазур В.Л., Хижняк Д.Д. Сопротивление деформации низколегированных сталей // Сталь. 1991. № 8. С. 41 – 43.
19. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
20. Лехов О.С., Михалев А.В., Билалов Д.Х., Шевелев М.М. Напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации при получении листов из стали для сварных труб. – В кн.: Материалы XI Международного конгресса прокатчиков. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2017. С. 95 – 100.

Поступила в редакцию 4 июля 2018  
 После доработки 11 сентября 2018  
 Принята к публикации 2 ноября 2018

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 4, PP. 270–275.

## STRESSES IN ANVILS OF VARIOUS CONSTRUCTION OF CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION PLANT AT PRODUCTION OF SHEETS FROM STEEL FOR WELDED PIPES

O.S. Lekhov<sup>1</sup>, A.V. Mikhalev<sup>1</sup>, M.M. Shevelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>JSC «Center of Thermal Imaging Diagnostics», Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** A comparative assessment of strenuous state of the anvils with and without channels has been carried out for the installation of combined continuous casting and deformation process in the production of steel sheets for welded pipes. The conditions of operation and loading of the anvils of combined continuous casting and deformation process are described. The design of anvil with channels for water cooling and the nature of its loading are given. Using the algorithm for solving problems in the elasticity theory by finite element method, the laws governing the distribution of axial stresses in anvils from the slab reduction force are determined. Effect of the channels for anvils cooling with water on the magnitude and nature of stresses distribution in them from the stress of the slab reduction was estimated. The calculation results of temperature fields and axial and equivalent thermoelastic stresses in anvils with channels are presented for the production process of steel sheets for welded pipes in a combined continuous casting and deformation unit. The article considers regularities of total stresses distribution in anvils with channels. To assess the effect of anvils structure on their stress state, regularities of distribution of thermoelastic and total stresses in strands without channels have been determined. The graph of dependence of thermoelastic stresses in the anvil on temperature of its contact surface is given. Recommendations for choosing the material of the anvils are given. The advantages and disadvantages of the anvils with channels for the unit for combined continuous casting and deformation are described. The parameters of such a pilot installation are presented. The authors also describe the results of an experimental study of the parameters of a combined process at the manufacture installation for continuous casting and deformation of JSC Ural Pipe Plant.

**Keywords:** installation, anvils, combined process, continuous casting, deformation, stress, compression force, temperature, heat flux density, finite element method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-270-275

## REFERENCES

1. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennyye 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.).
2. Vyunnenberg K. Production of continuously cast billets meeting the highest quality requirements. In: *Trudy shestogo mezhdunarodnogo kongressa zheleza i stali. T. 3* [Proceedings of the Sixth Int. Congress of Iron and Steel. Vol. 3]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, pp. 364–376. (In Russ.).
3. Kokh G., Kopp R. Progress in the field of deformations under large compression. *Chernye metally*. 1979, no. 21, pp. 3–11. (In Russ.).
4. Yamada K., Vatanabe T., Abe K., Funkda T. Continuous casting of small section billets. *Chernye metally*. 1981, no. 10, pp. 18–23. (In Russ.).
5. Erenberg Kh.-Yu. Casting and compression from the casting of thin slabs at the factory of “Mannesman Rhenen-Verke AG” Company. In: *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov* [Metallurgical production and technology of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 46–56. (In Russ.).
6. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu to Hagane*. 1977, vol. 63, no. 8, pp. 1297–1304.
7. Pechke Yu., Noimnerts D. Methods of continuous casting combined with rolling. *Chernye metally*. 1981, no. 22, pp. 9–13. (In Russ.).
8. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Transact. Iron and Steel Inst. Japan*. 1978, vol. 18, no. 8, pp. 510–518.
9. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical and Physical Models in Iron and Steel Industry Proceedings of the 3rd Process Technological. Conference, Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York, 1982, pp. 264–270.
10. Efron L.I. *Metallovedenie v “bol'shoi” metallurgii. Trubnye stali* [Metal science in iron and steel making. Pipe steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2012, 696 p. (In Russ.).
11. Lekhov O.S., Mikhalev A.V. *Ustanovka sovmeshchennogo protsesa nepreryvnogo litia i deformatsii dlya proizvodstva listov iz stali dlya svarnykh trub. Teoriya i raschet* [Installation of combined

- continuous casting and deformation process for production of steel sheets for welded pipes. Theory and calculation]. Ekaterinburg: izd. UMTs UPI, 2017, 151 p. (In Russ.).
12. Lekhov O.S. Study of stress-strain state of the rolls during rolling of band-beam in the stands of universal beam mill. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 10, pp. 37–41. (In Russ.).
  13. 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.). (In Russ.).
  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). (In Russ.).
  15. ANSYS. *Structural Analysis Guide*. Rel. 12.0. Available at URL: <http://www.cadfern.ru>.
  16. Norrie D.H., de Vries G. *An introduction to finite element analysis*. New York: Academic Press, 1978. (Russ.ed.: Norrie D., de Vries G. *Vvedenie v metod konechnykh elementov*. Moscow: Mir, 1981, 304 p.).
  17. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of the deformable solid]. Moscow: Nauka, 1979, 744 p. (In Russ.).
  18. Mazur D.D., Khizhnyak V.L. Low-alloyed steels resistance to deformation. *Stal'*. 1991, no. 8, pp. 41–43. (In Russ.).
  19. Hensel Arno, Spittel Thilo. *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. Leipzig, Verlag, 1978. (Russ.ed.: Hensel A., Spittel T. *Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki metallov davleniem: Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p.).
  20. Lekhov O.S., Mikhalev A.V., Bilalov D.H., Shevelev M.M. Stress state of the anvils of a continuous casting and deformation unit for production of steel sheets for welded pipes. In: *Materialy XI Mezhdunarodnogo Kongressa Prokatchikov* [Materials of the 11th Int. Congress of Rollers]. Magnitogorsk: izd. MGTU, 2017, pp. 95–100. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**O.S. Lekhov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy  
(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 4, 2018

Revised September 11, 2018

Accepted November 2, 2018