

- arodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2014, no. 3 (22). Part 2, pp. 63, 64. (In Russ.).
7. Bashnin Yu. A., Ushakov B.K., Sekei A.G. *Tehnologiya termicheskoi obrabotki stali. Uchebnik dlya vuzov* [Heat treatment technologies of steel. Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 424 p. (In Russ.).
 8. Peretyat'ko V.N., Temlyantcev M.V., Filippova M.V. *Razvitie teorii i praktiki metallurgicheskikh tehnologii. T. 2. Plastichnost' i razrushenie stali v protsessakh nagreva i obrabotki davleniem* [The development of the theory and practice of metallurgical technologies. Vol. 2. Steel plasticity and destruction in the heating and forming processes]. Moscow: Teplotehnik, 2010. 352 p. (In Russ.).
 9. Simachev A.S., Temlyantcev M.V., Oskolkova T.N. High-temperature plasticity of rail electric steel Eh76F. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii RAEN*. 2014. Issue 16, pp. 79–82. (In Russ.).
 10. Simachev A.S., Temlyantcev M.V., Oskolkova T.N. The research of high-temperature plasticity of rail electric steel Eh76F. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii RAEN*. 2014. Issue 32, pp. 23–27. (In Russ.).
 11. Pavlov V.V., Temlyantcev M.V., Korneva L.V., Oskolkova T.N., Gavrilov V.V. *Defekty i kachestvo rel'sovoi stali: spravochnik* [Defects and quality of rail steel: reference book]. Moscow: Teplotehnik, 2006. 218 p. (In Russ.).
 12. Dzugutov M.Ya. *Plastichnost' i deformiruemost' vysokolegirovannykh staley i splavov* [Plasticity and deformability of high-alloyed steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 303 p. (In Russ.).
 13. Temlyantcev M.V., Kolotov E.A., Syusyukin A.Yu., Gavrilov V.V. The development of heat technologies of rail feedstock in a continuous walking-beam furnace. *Stal'*. 2006, no. 12, pp. 33–35. (In Russ.).
 14. Simachev A.S. Nonmetallic influences on high-temperature plasticity of continuously cast ingots of rail steel Eh76F. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike*. 2014. Vol. 4, pp. 122–124. (In Russ.).
 15. Velikanov A.V., Reyhart V.A., Kaportsev V.N. Impact of the methods of out-of-furnace treatment on the quality of rails from basic oxygen steel. In: *Nemetallicheskie vklyucheniya v stalyakh* [Non-metallic inclusions in steel]. Moscow: Metallurgiya, 1983, pp. 35–42. (In Russ.).

Received August 25, 2014

УДК 621.771:621.74

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ВАЛКИ–ПОЛОСА ПРИ ПРОКАТКЕ ШИРОКОПОЛОЧНОЙ БАЛКИ В КЛЕТЯХ УНИВЕРСАЛЬНО-БАЛОЧНОГО СТАНА. СООБЩЕНИЕ 1

Лехов О.С., д.т.н., профессор (MXLehov38@yandex.ru)

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

Аннотация. Представлены результаты решения задачи одновременного определения напряжений в очаге деформации и в горизонтальных валках при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Определены закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очагах деформации балки, а также напряжения в валках от усилия прокатки.

Ключевые слова: широкополочная балка, прокатка, напряженно-деформированное состояние, вертикальные и горизонтальные валки, метод конечных элементов, модуль упругости, сопротивление пластической деформации, тангенциальные и радиальные напряжения.

Для повышения технико-экономических показателей производства двутавровых профилей на универсально-балочном стане Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК) осуществлен перевод предприятия на работу с непрерывнолитой заготовкой, в том числе двутаврового сечения [1]. Основной проблемой, возникающей при прокатке непрерывнолитых заготовок, является обеспечение благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, получение высоких механических свойств и однородной структуры металла.

Определение напряжений от усилия прокатки и термоупругих напряжений в валках универсальных клетей позволит разработать рекомендации для повышения их стойкости. Для этого одновременно с исследованием напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации необходимо определить поле напряжений в валках универсальной клетки.

В качестве метода исследования использован вычислительный эксперимент на базе решения задач

механики сплошной среды методом конечных элементов [1].

На первом этапе расчета проведено моделирование процесса продольной прокатки двутавровой балки в клетях универсального балочного стана. Моделирование выполняли в объемной постановке с использованием программного продукта ANSYS [2].

Упор сделан на определение напряженно-деформированного состояния и характер течения металла, возникающего в очаге деформации при прокатке балки 30Ш в горизонтальных и вертикальных валках универсальных клетей ГУК 1 и ГУК 2 универсально-балочного стана НТМК. Кроме исследования очага деформации определяли напряженно-деформированное состояние валков в областях, прилегающих к очагу деформации.

Материал балки в очаге деформации испытывает упругопластические деформации, которые достигают максимальных значений. Поскольку их уровень высок, то при описании модели балки в очаге деформа-

ции учтена не только физическая, но и геометрическая нелинейность. Для валков принимаем следующее: материал, из которых они изготовлены, подвержен только упругим деформациям и напряжениям, подчиняющимся закону Гука; в очагах деформации между валками и балкой действует закон сухого трения Кулона.

При исследовании напряженно-деформированного состояния двутавровой балки и валков при прокатке пренебрегали инерционными и массовыми силами; деформируемый металл балки считали несжимаемым и изотропно упрочняющимся; материал валков – подчиняется закону Гука. При записи уравнений состояния будем использовать случай простого нагружения для пяти вариантов. На основе анализа объемной задачи рассматривается процесс прокатки для пяти вариантов. Параметры двутавровой балки, принятые для расчета, приведены ниже:

Вариант расчет	Проход	$h_{ст}$, мм	$B_{ст}$, мм	$\Delta h_{ст}$, мм	$H_{п}$, мм	$B_{п}$, мм	$\Delta h_{п}$, мм	$T_{м}$, °C
<i>Клеть ГУК 1</i>								
1	3	16,4	265	3,1	27,7	204	7,7	1040
2	5	11,6	265	2,2	17,9	201	4,2	980
<i>Клеть ГУК 2</i>								
3	7	9,1	266	1,1	13,7	197	1,8	900
4	То же	То же	То же	То же	То же	То же	То же	800
5	То же	То же	То же	То же	То же	То же	То же	700

Во всех случаях рассматривали прокатку заготовки длиной $L = 30$ м из стали марки 09Г2. Диаметры горизонтальных и вертикальных валков приняты равными 1500 и 1000 мм соответственно. Модуль упругости материала валков принят равным 209 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3. Схема продольной прокатки показана на рис. 1.

Модуль упругости E определили по следующей зависимости [1]:

$$E = -4,566 \cdot 10^5 + 160T + \frac{3,266 \cdot 10^8}{T}, \quad (1)$$

где T – температура металла.

Соппротивление σ_s пластической деформации вычислено по уравнению

$$\sigma_s = 288u_i^{0,107} (\ln \varepsilon_i)^{1,45} e^{-0,00235T}, \quad (2)$$

где u_i – скорость деформации, c^{-1} ; ε_i – степень деформации, %.

Результаты расчета процесса прокатки представлены в виде эпюр распределения нормальных и касательных напряжений по дугам захвата и ширине очага деформации балки с горизонтальными валками (рис. 2).

Для удобства представления результатов расчета на поверхности стенки балки изображена равномерная сеть линий. Линии 1 – 13 расположены вдоль поверхности контакта очага деформации балки с горизонтальным валком. Линия 1 находится в плоскости симметрии стенки, а линия 13 – в зоне перехода стенки в полку (линия контакта стенки с краем горизонтального валка).

Для этих вариантов максимальные значения нормальных и касательных напряжений в очагах деформации балки с вертикальным и горизонтальным валками представлены в табл. 1. Анализ расчетных данных показывает, что в очаге деформации двутавровой заготовки в горизонтальных и вертикальных валках универсальной клетки реализуется благоприятная с по-

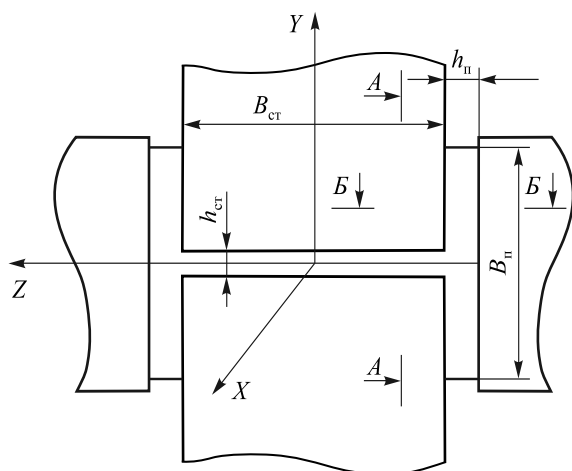


Рис. 1. Схема продольной прокатки двутавровой балки

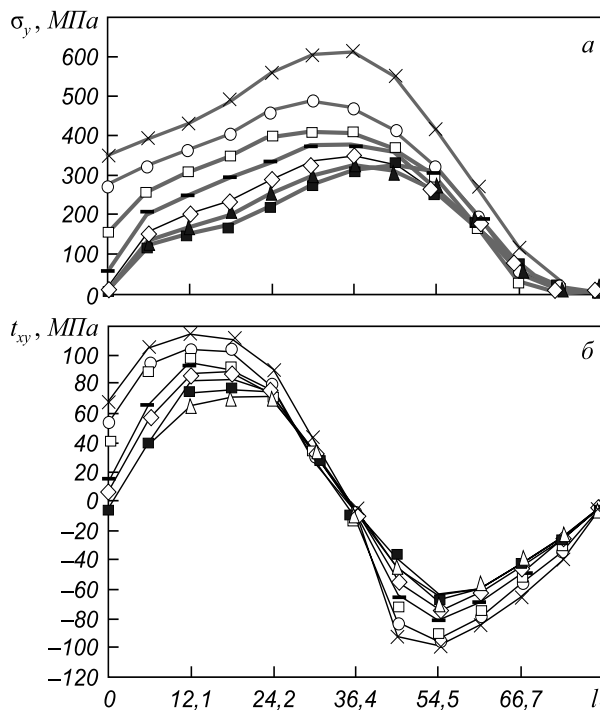


Рис. 2. Эпюра контактных нормальных (а) и касательных (б) напряжений по дуге захвата l_1 и ширине очага деформации балки с горизонтальным валком (прокатка балки 30Ш в ГУК 1 (проход 3); температура прокатки 1040 °C):
 ■ – 1; △ – 6; ▲ – 8; ◇ – 9; — – 10; □ – 11; ○ – 12; × – 13

Максимальные (контактные) нормальные и касательные напряжения в очагах деформации балки с вертикальным и горизонтальным валками

Вариант расчета	Клеть	Проход	Значение нормальных и касательных напряжений в зоне контакта балки с валками, МПа						$T_m, ^\circ\text{C}$
			горизонтальными		горизонтальными (боковая поверхность)		вертикальными		
			σ_x	t_{xy}	σ_z	t_{zx}	σ_z	t_{zx}	
1	ГУК 1	3	610	114	544	84	514	119	1040
-98				-104		-95			
2	ГУК 1	5	627	118	550	86	528	122	980
-101				-107		-98			
3	ГУК 2	7	540	92	640	101	573	108	900
-93				-124		-102			
110				120		130			
-112				-150		-118			
4	ГУК 2	7	648	143	770	161	688	171	800
-150				-197		-162			
5	ГУК 2	7	862	143	1028	161	913	171	700
-150				-197		-162			

П р и м е ч а н и е. Положительные значения соответствуют зоне отставания, а отрицательные значения – зоне опережения в очаге деформации.

зиции качества проката схема напряженного состояния с преобладанием высоких сжимающих напряжений. Например, нормальные напряжения σ_x в очаге деформации горизонтальных валков при изменении температуры балки от 1040 до 700 °С возрастают от 610 до 862 МПа, а нормальные напряжения σ_z на контактной поверхности вертикального валка изменяются от 514 до 913 МПа. Высокие сжимающие напряжения имеют место в очаге деформации двутавровой заготовки и в направлении других осей координат. Такая схема напряженного состояния в очаге деформации заготовки в универсальной клетке будет способствовать интенсивной проработке литого металла по всему сечению балки с завариванием несплошностей и пор, предотвратит раскрытие поверхностных трещин, т.е. позволит получить балки высокого качества. Износ торцевой поверхности горизонтального валка, определяющий качество балки, зависит от величины касательных напряжений в зоне контакта боковой поверхности горизонтального валка с полкой балки. Величина этих напряжений существенно зависит от разности скоростей металла и точек торцевой поверхности горизонтального валка в зоне контакта, а также от температуры металла. Так, например, при снижении температуры металла с 1040 до 700 °С касательные напряжения изменяются от 84 до 197 МПа, а нормальные напряжения σ_z при этом возрастают от 544 до 1028 МПа.

Для определения напряжений в валках рабочих клетей использованы зависимости и алгоритм решения краевых задач теории упругости методом конечных элементов в объемной постановке [3, 4].

Результаты расчета напряженного состояния валков от усилия прокатки представлены для их поверхностного слоя вблизи очага деформации. Положение сечений, где приведены напряжения, указаны на рис. 3.

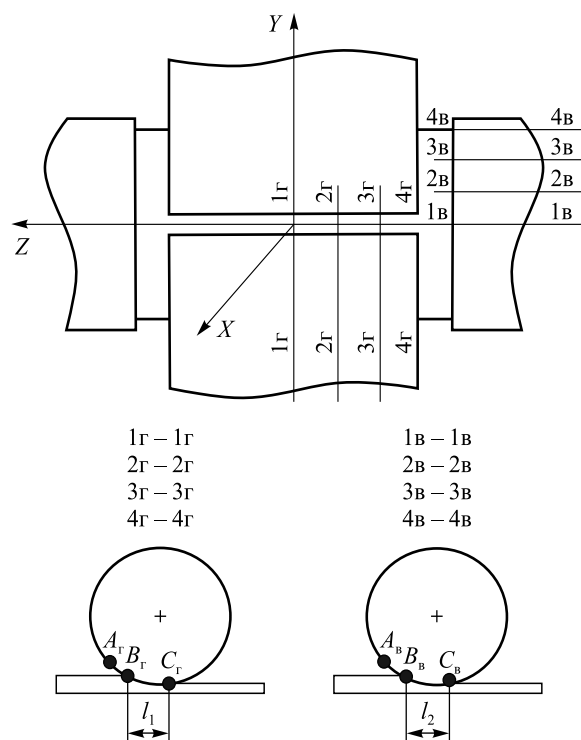


Рис. 3. Положение сечений и линий в валках, где приведены эпюры радиальных и тангенциальных напряжений (напряжения для горизонтального валка приведены на развертке линий $A_G - B_G - C_G$; для вертикального валка – на развертке линий $A_B - B_B - C_B$)

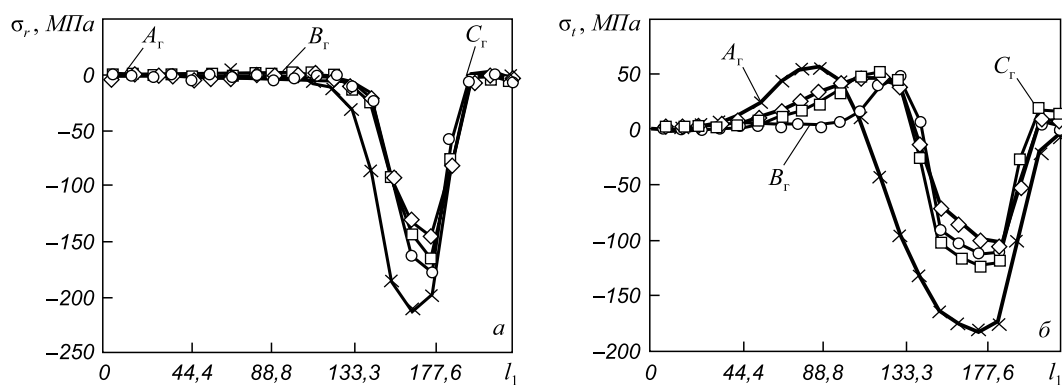


Рис. 4. Эпюры радиальных σ_r (а) и тангенциальных σ_t (б) напряжений на поверхности горизонтального вала вблизи очага деформации при прокатке двутавровой балки 30Ш в клети ГУК 1 (проход 3) при температуре прокатки 1040 °С:

◇ – 1г; □ – 2г; ○ – 3г; × – 4г

Таблица 2

Максимальные радиальные и тангенциальные напряжения в вертикальных и горизонтальных валах

Вариант расчет	Клеть	Проход	Значения напряжений, МПа, в горизонтальных/вертикальных валах			$T_m, ^\circ\text{C}$
			σ_r	σ_t	σ_t	
1	ГУК 1	3	-213/-300	56/54	-183/-231	1040
2		5	-231/-284	59/51	-191/-220	980
3	ГУК 2	7	-220/-257	37/23	-208/-245	900
4			-258/-300	43/26	-244/-287	800
5			-354/-413	59/36	-336/-394	700

Поскольку определяющими напряжениями являются радиальные и тангенциальные, то на рис. 4 приведены только эти напряжения. Напряжения приведены на развертке дуг, указанных на рис. 3.

Ось абсцисс совпадает с направлением прокатки. В табл. 2 представлены значения максимальных радиальных и тангенциальных напряжений для всех рассчитанных вариантов.

Из представленных рисунков и таблицы следует, что радиальные напряжения не превышают 300 МПа. Причем эти напряжения выше в вертикальных валах. В случае понижения температуры прокатки в клети ГУК 2 с 900 до 700 °С радиальные напряжения увеличиваются в 1,6 раза, которые являются напряжениями сжатия и действуют в области очага деформации.

Тангенциальные напряжения в области очага деформации являются также сжимающими. Они существенно зависят от температуры прокатываемого металла. При изменении температуры металла от 1040 до 700 °С тангенциальные сжимающие напряжения в горизонтальных валах в области очага деформации возрастают от 183 до 336 МПа, а в вертикальных валах – от 231 до 394 МПа. Напряжения растяжения в валах возникают в области их входа в очаг деформации – участки $A_r - B_r$ и $A_b - B_b$ (рис. 3). Растягивающие тангенциальные напряжения достигают своего максимального значения на расстоянии примерно, равном одной трети длины очага деформации, величина которых не превышает 60 МПа.

Выводы. Поставлена и решена задача одновременного определения напряженно-деформированного состояния двутавровой заготовки и валков при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Определены максимальные значения нормальных и касательных напряжений в очагах деформации и напряжения в вертикальных и горизонтальных валах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. – 411 с.
2. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel.6.0. [http:// www.cadferm.ru](http://www.cadferm.ru)
3. Комратов Ю.С., Лехов О.С. // Производство проката. 2007. № 7. С. 17 – 19.
4. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.

© 2014 г. Лехов О.С.
Поступила 8 мая 2014 г.

**STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF THE ROLLS DURING ROLLING OF BAND-BEAM
IN THE STANDS OF UNIVERSAL BEAM MILL**

Lekhov O.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor (MXLekhov38@yandex.ru)

Russian State Professional Pedagogical University (11, Mechanical Engineers str., Yekaterinburg, 620012, Russia)

Abstract. The results of solving the problem of simultaneous determination of the stresses in the deformation zone and horizontal rolls in the rolling-beam in the stands universal beam mill are described. The regularities of the distribution of normal and tangential stresses in the deformation of the beam, and the voltage in the rolls of the rolling force are determined.

Keywords: beam, rolling, the stress-strain state, the vertical and horizontal rolls, finite element method, the modulus of elasticity, resistance to plastic deformation, the tangential and radial stresses.

REFERENCES

1. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennye protsessy nepre-ryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [The combined processes of continuous casting and deformation for production of rolled products]. Ekaterinburg: UGTU – UPI, 2009. 411 p. (In Russ.).
2. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel.6.0. Available at: <http://www.cadferm.ru>.
3. Komratov Yu.S., Lekhov O.S. Calculation of stresses from the rolling forces in the vertical and horizontal rolls of the universal stand-beam mill. *Proizvodstvo prokata*. 2007, no. 7, pp.17–19. (In Russ.).
4. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of deformable solids]. Moscow: Nauka, 1979. 744 p. (In Russ.).

Received May 8, 2014