

УДК 621.771

Огинский И. К.
Ремез О. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ В КАЛИБРАХ СИСТЕМЫ «РОМБ-КВАДРАТ»

Система калибров «ромб-квадрат» применяется в сортопрокатном производстве в числе других вытяжных систем при прокатке углеродистых и специальных сталей. Технологические основы создания названных систем были заложены достаточно давно, основными подходами при их создании были экспериментальные. Теоретические методы появились и получили свое развитие несколько позже, они продолжали развиваться в работах более позднего и настоящего периода времени [1–6 и др.]. Разработка технологии прокатки для различных групп сталей на непрерывных станах, выполняется в отсутствие достаточно глубоких сведений о взаимосвязи высотной и поперечной деформаций в условиях переднего, заднего натяжения и совместного их действия. Недостаточно исследованным также, является влияние систем вытяжных калибров на параметры прокатки в непрерывных станах.

Основные сведения о закономерностях изменения технологических параметров и их взаимосвязи при прокатке в калибрах были установлены в результате физического моделирования. Методы компьютерного моделирования, активно развивающиеся в последнее время, позволяют получить дополнительные сведения, однако они не являются достаточными для использования в практических целях. Не все программные средства являются достаточно адаптированными для практических задач. Некоторые программные пакеты по своему замыслу являются специализированными для решения задач сортовой прокатки [7, 8], но и они в прямой форме не обладают достаточными возможностями. Недостаток апробированных решений, вызывает необходимость развития и создания новых научных подходов и делает работы в этих направлениях актуальными.

Целью настоящей работы является развитие подходов к исследованиям кинематических параметров непрерывной сортовой прокатки на основе методов компьютерного моделирования, выявление на этой основе сведений о закономерностях изменения технологических параметров при непрерывной прокатке в системе вытяжных калибров «ромб-квадрат».

Исследования параметров прокатки в калибрах системы «ромб-квадрат» проводилось с использованием программы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением FORGE 3D, разработанной компанией TRANSVALOR S.A. FORGE 3D. Основой программы является метод конечных элементов. По утверждению разработчиков, она обеспечивает выполнение расчетов технологических параметров с минимальным объемом натуральных экспериментов. Программа предназначена для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением в достаточно широкой постановке, в части кинематики и условий трения металла и инструмента.

Расчет формоизменения, полей напряжений, степени деформации и температур основан на минимизации функционала вариационного принципа Лагранжа, функционал которого сформулирован следующим образом:

$$I = \int_V \left(\int_0^H T dH \right) dV - \int_V F_i U_i dV - \int_S f_i U_i dS, \quad (1)$$

где T – интенсивность касательных напряжений;

H – интенсивность скоростей деформации сдвига;

F_i, f_i, U_i – проекции векторов объемных сил, поверхностных нагрузок и скоростей течения, соответственно;

S – площадь поверхности контакта металла с валком;

V – деформируемый объем.

В программе используются конечные элементы в виде тетраэдров с линейной аппроксимацией среднего напряжения и кусочно-линейной аппроксимацией скорости (по угловым узлам элемента и узлу в центре тяжести элемента).

Сопротивление деформации (напряжение текучести) деформируемого материала могут быть заданы на основе данных Хензеля-Шпиттеля [19].

В FORGE 3D доступно 6 моделей для описания трения между деформируемым объектом и инструментом, одной из них является вязкопластическая модель трения:

$$\tau = -\alpha_f \cdot K \cdot |v_s|^{q-1} \cdot v_s, \quad (2)$$

где α_f – коэффициент трения, который зависит от нормальных напряжений на контакте;

q – чувствительность к скорости скольжения;

v_s – разница касательных составляющих скоростей заготовки и инструмента.

Среди других: модель трения Треска, комбинированная модель закона Кулона и модели Треска, модель трения «Nocontact» (модель позволяет не учитывать контакт между инструментом и деформируемым объектом или между двумя деформируемыми объектами), модель трения Бернхардта и модель трения Ноймайера.

Основу тепловой части модели составляет уравнение теплопроводности, приведенное в общем виде:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q_{def}, \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности;

q_{def} – тепло, выделяемое при деформации.

Граничные условия при решении температурной задачи:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_c) + \varepsilon_r \times \sigma_r (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

где n – вектор, ортогональный к поверхности;

T_0 – температура окружающей среды или инструмента;

ε_r – степень черноты поверхности;

σ_r – константа Больцмана;

h_c – коэффициент теплопередачи.

Исследования проводились для стали 08X13 с химическим составом по ГОСТ 5632–72. Указанная сталь относится к числу тех, которые обладают склонностью к повышенному уширению. Названная особенность сталей изучена в недостаточной степени, и по этой причине возникают трудности при разработке режимов обжати. Указанные стали содержатся в марочном сортаменте заводов, производящие специальные стали и представляют практический интерес.

Результаты моделирования (табл. 1–3) были предназначены, в частности, для использования в экспериментальных исследованиях. Индексы и символы « B/n » относятся к прокатке без натяжения, « H » – к прокатке с натяжением. b_1 и F_1 – соответственно, ширина раската и площадь поперечного сечения после прокатки. Параметр h_1 означает высоту раската после прокатки, численно он равен высоте раската по дну калибра, например, на рис. 2 $h_1 = 2$ мм. V_0 – скорость раската на входе в очаг деформации, V_1 – скорость прокатки.

Исходные данные и условия моделирования прокатки: скорость вращения валков – 32 об/мин, размеры заготовки – квадрат со стороной 20 мм ($h_0 = 28,56$ мм; $b_0 = 28,56$ мм), диаметр по дну калибра – 194 мм.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса прокатки по схеме «квадрат-ромб» с задним натяжением

h_1 , мм	F_1 , мм ²			b_1 , мм			Δb , мм		λ			V_0/V_{0H1}	V_{1H}/V_1	$\Delta b_H/\Delta b$	λ_H/λ
	B	H	Δ , %	B	H	Δ , %	B/H	H	B/H	H	Δ , %				
12,6	274,51	270,85	-1,35	35,28	34,49	-2,3	6,72	5,94	1,457	1,477	1,331	1,025	0,998	0,883	1,013
13,6	298,36	294,34	-1,37	34,19	33,41	-2,3	5,63	4,85	1,341	1,359	1,348	1,025	0,991	0,861	1,014
14	306,05	300,95	-1,69	33,84	33,15	-2,1	5,28	4,59	1,307	1,329	1,667	1,025	0,995	0,869	1,017
15	325,74	320,09	-1,77	33,02	32,34	-2,1	4,46	3,78	1,228	1,250	1,735	1,025	0,992	0,848	1,018
17	353,51	349,08	-1,27	31,61	31,23	-1,2	3,05	2,66	1,132	1,146	1,253	1,025	0,997	0,875	1,013
21	384,87	379,74	-1,35	29,63	29,32	-1,1	1,07	0,76	1,039	1,053	1,331	1,025	0,994	0,707	1,013
12,6	274,51	268,96	-2,06	35,28	33,94	-3,9	6,72	5,38	1,457	1,487	2,021	1,050	0,990	0,800	1,021
13,6	298,36	293,28	-1,73	34,19	32,93	-3,9	5,63	4,36	1,341	1,364	1,705	1,050	0,986	0,775	1,017
14	306,05	298,71	-2,46	33,84	32,64	-3,7	5,28	4,08	1,307	1,339	2,398	1,050	0,984	0,772	1,025
15	325,74	314,79	-3,48	33,02	31,87	-3,6	4,46	3,31	1,228	1,271	3,358	1,050	0,991	0,741	1,035
17	353,51	344,40	-2,65	31,61	30,65	-3,1	3,05	2,09	1,132	1,161	2,576	1,050	0,991	0,687	1,026
21	384,87	375,59	-2,47	29,63	29,08	-1,9	1,07	0,52	1,039	1,065	2,410	1,050	0,979	0,485	1,025
12,6	274,51	264,08	-3,95	35,28	33,27	-6,1	6,72	4,71	1,457	1,515	3,799	1,075	0,984	0,701	1,039
13,6	298,36	286,78	-4,04	34,19	32,41	-5,5	5,63	3,85	1,341	1,395	3,883	1,075	0,978	0,683	1,040
14	306,05	294,28	-3,99	33,84	32,23	-5,0	5,28	3,67	1,307	1,359	3,845	1,075	0,981	0,694	1,040
15	325,74	313,22	-3,99	33,02	31,64	-4,4	4,46	3,08	1,228	1,277	3,842	1,075	0,984	0,689	1,040
17	353,51	338,91	-4,31	31,61	30,46	-3,8	3,05	1,90	1,132	1,180	4,129	1,075	0,983	0,625	1,043
21	384,87	373,39	-3,08	29,63	28,95	-2,4	1,07	0,39	1,039	1,071	2,979	1,075	0,961	0,360	1,031
12,6	274,51	261,48	-4,98	35,28	32,80	-7,6	6,72	4,24	1,457	1,530	4,746	1,1	0,974	0,631	1,050
13,6	298,36	280,20	-6,48	34,19	31,55	-8,4	5,63	2,99	1,341	1,428	6,087	1,1	0,973	0,531	1,065
14	306,05	288,6	-6,05	33,84	31,66	-6,9	5,28	3,10	1,307	1,386	5,701	1,1	0,973	0,586	1,060
15	325,74	305,21	-6,72	33,02	30,87	-6,9	4,46	2,31	1,228	1,311	6,300	1,1	0,975	0,518	1,067
17	353,51	335,57	-5,35	31,61	30,17	-4,7	3,05	1,61	1,132	1,192	5,076	1,1	0,981	0,530	1,053
21	384,87	369,82	-4,07	29,63	28,73	-3,1	1,07	0,17	1,039	1,082	3,909	1,1	0,935	0,161	1,041

Таблица 2

Результаты моделирования процесса прокатки по схеме «квадрат-ромб» с передним натяжением

h_l , мм	F_l , мм ²			b_l , мм			ΔB , мм		λ			V_0/V_{0H1}	V_{IH}/V_I	$\Delta b_H/\Delta b$	λ_H/λ
	B	H	Δ , %	B	H	Δ , %	B/H	H	B/H	H	Δ , %				
12,6	274,51	274,53	0,009	35,28	35,11	-0,51	6,72	6,55	1,457	1,457	-0,009	1,002	1,025	0,973	1,000
13,6	298,36	296,69	-0,566	34,19	33,86	-0,97	5,63	5,30	1,341	1,348	0,563	0,979	1,025	0,942	1,006
14	306,05	302,37	-1,216	33,84	33,48	-1,08	5,28	4,92	1,307	1,323	1,201	0,999	1,025	0,932	1,012
15	325,74	320,48	-1,639	33,02	32,62	-1,23	4,46	4,06	1,228	1,248	1,613	0,983	1,025	0,910	1,016
17	353,51	347,23	-1,809	31,61	31,25	-1,13	3,05	2,69	1,132	1,152	1,777	0,999	1,025	0,885	1,018
21	384,87	381,02	-1,008	29,63	29,44	-0,64	1,07	0,88	1,039	1,050	0,998	0,985	1,025	0,823	1,010
12,6	274,51	274,41	-0,035	35,28	35,23	-0,14	6,72	6,67	1,457	1,458	0,035	0,994	1,05	0,993	1,000
13,6	298,36	294,49	-1,314	34,19	33,93	-0,77	5,63	5,37	1,341	1,358	1,297	0,978	1,05	0,954	1,013
14	306,05	303,06	-0,987	33,84	33,41	-1,28	5,28	4,85	1,307	1,320	0,977	0,975	1,05	0,919	1,010
15	325,74	320,36	-1,678	33,02	32,52	-1,55	4,46	3,96	1,228	1,249	1,650	0,979	1,05	0,887	1,017
17	353,51	344,68	-2,562	31,61	30,96	-2,10	3,05	2,40	1,132	1,160	2,498	0,983	1,05	0,786	1,026
21	384,87	378,65	-1,640	29,63	29,33	-1,03	1,07	0,77	1,039	1,056	1,614	0,969	1,05	0,717	1,016
12,6	274,51	274,16	-0,127	35,28	35,21	-0,22	6,72	6,65	1,457	1,459	0,127	0,993	1,075	0,989	1,001
13,6	298,36	294,74	-1,229	34,19	33,84	-1,03	5,63	5,28	1,341	1,357	1,214	1,007	1,075	0,938	1,012
14	306,05	300,48	-1,853	33,84	33,36	-1,45	5,28	4,80	1,307	1,331	1,819	0,977	1,075	0,908	1,019
15	325,74	318,27	-2,346	33,02	32,57	-1,40	4,46	4,01	1,228	1,257	2,292	0,982	1,075	0,898	1,023
17	353,51	340,54	-3,809	31,61	30,74	-2,80	3,05	2,18	1,132	1,175	3,669	0,980	1,075	0,717	1,038
21	384,87	375,84	-2,401	29,63	29,21	-1,43	1,07	0,65	1,039	1,064	2,345	0,944	1,075	0,610	1,024
12,6	274,51	273,62	-0,324	35,28	35,18	-0,28	6,72	6,62	1,457	1,462	0,323	0,988	1,1	0,985	1,003
13,6	298,36	294,71	-1,241	34,19	33,89	-0,88	5,63	5,33	1,341	1,357	1,225	0,979	1,1	0,947	1,012
14	306,05	303,24	-0,926	33,84	33,52	-0,97	5,28	4,96	1,307	1,319	0,917	0,984	1,1	0,938	1,009
15	325,74	320,49	-1,634	33,02	32,62	-1,24	4,46	4,06	1,228	1,248	1,608	0,984	1,1	0,909	1,016
17	353,51	338,59	-4,406	31,61	30,65	-3,13	3,05	2,09	1,132	1,181	4,220	0,967	1,1	0,685	1,044
21	384,87	373,68	-2,994	29,63	29,13	-1,73	1,07	0,57	1,039	1,070	2,907	0,933	1,1	0,528	1,030

Таблица 3

Результаты моделирования процесса прокатки по схеме «квадрат-ромб» с передним и задним натяжением

h_l , мм	b_l , мм			F_l , мм ²			ΔB , мм		λ			$V_0/V_{0H} = V_{IH}/V_l$	$\Delta b_H/\Delta b$	λ_H/λ
	B	H	Δ , %	B	H	Δ , %	B/H	H	B/H	H	Δ , %			
12,6	35,28	33,28	-6,034	274,51	274,53	0,009	6,72	4,72	1,457	1,515	3,845	1,025	0,701	1,040
13,6	34,19	32,11	-6,49	298,36	296,69	-0,566	5,63	3,55	1,341	1,407	4,722	1,025	0,630	1,050
14	33,84	31,89	-6,09	306,05	302,37	-1,216	5,28	3,34	1,307	1,370	4,613	1,025	0,632	1,048
15	33,02	31,30	-5,49	325,74	320,48	-1,639	4,46	2,74	1,228	1,294	5,077	1,025	0,615	1,053
17	31,61	30,49	-3,65	353,51	347,23	-1,809	3,05	1,93	1,132	1,174	3,610	1,025	0,634	1,037
21	29,63	28,75	-3,08	384,87	381,02	-1,008	1,07	0,19	1,039	1,081	3,880	1,025	0,174	1,040
12,6	35,28	31,57	-11,77	274,51	274,41	-0,035	6,72	3,01	1,457	1,572	7,301	1,05	0,448	1,079
13,6	34,19	30,59	-11,75	298,36	294,49	-1,314	5,63	2,04	1,341	1,465	8,471	1,05	0,362	1,093
14	33,84	30,57	-10,72	306,05	303,06	-0,987	5,28	2,01	1,307	1,420	7,976	1,05	0,380	1,087
15	33,02	30,12	-9,65	325,74	320,36	-1,678	4,46	1,56	1,228	1,339	8,278	1,05	0,349	1,090
17	31,61	29,49	-7,18	353,51	344,68	-2,562	3,05	0,93	1,132	1,222	7,404	1,05	0,305	1,080
21	29,63	28,63	-3,49	384,87	378,65	-1,640	1,07	0,07	1,039	1,071	2,981	1,05	0,066	1,031
12,6	35,28	30,12	-17,14	274,51	274,16	-0,127	6,72	1,56	1,457	1,637	10,987	1,075	0,232	1,123
13,6	34,19	29,60	-15,49	298,36	294,74	-1,229	5,63	1,04	1,341	1,516	11,590	1,075	0,185	1,131
14	33,84	29,56	-14,49	306,05	300,48	-1,853	5,28	1,00	1,307	1,480	11,667	1,075	0,189	1,132
15	33,02	29,19	-13,15	325,74	318,27	-2,346	4,46	0,62	1,228	1,393	11,871	1,075	0,140	1,135
17	31,61	29,03	-8,87	353,51	340,54	-3,809	3,05	0,47	1,132	1,254	9,739	1,075	0,155	1,108
21	29,63	27,63	-7,23	384,87	375,84	-2,402	1,07	-0,93	1,039	1,114	6,744	1,075	-0,866	1,072
12,6	35,28	29,07	-21,39	274,51	273,62	-0,324	6,72	0,50	1,457	1,700	14,305	1,1	0,075	1,167
13,6	34,19	28,44	-20,22	298,36	294,71	-1,241	5,63	-0,12	1,341	1,589	15,626	1,1	-0,021	1,185
14	33,84	28,40	-19,15	306,05	303,24	-0,926	5,28	-0,16	1,307	1,544	15,339	1,1	-0,030	1,181
15	33,02	28,07	-17,64	325,74	320,49	-1,634	4,46	-0,49	1,228	1,450	15,317	1,1	-0,110	1,181
17	31,61	27,84	-13,53	353,51	338,59	-4,406	3,05	-0,72	1,132	1,305	13,318	1,1	-0,237	1,154
21	29,63	27,08	-9,43	384,87	373,68	-2,994	1,07	-1,48	1,039	1,156	10,106	1,1	-1,385	1,112

Свойства деформируемых материалов представлены реологическими зависимостями, приведенными в работе [20], в графическом виде они представлены на рис. 1.

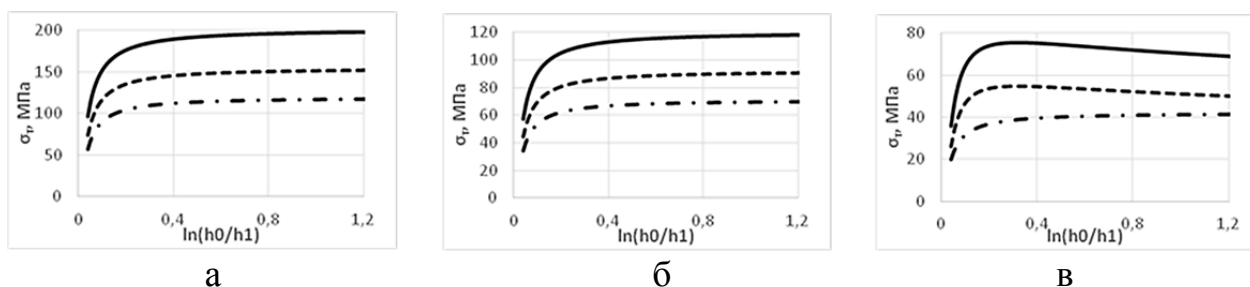


Рис. 1. Реологические зависимости стали 08X13:

а – температура деформации 800 °С; б – температура деформации 1000 °С; в – температура деформации 1200 °С; ε : — - 10⁻¹с⁻¹; ε: --- 1⁻¹с⁻¹; ε: - · - 0,1⁻¹с⁻¹

Форма и размеры ромбического калибра, а также задаваемой в него квадратной заготовки представлены на рис. 2. Параметры названного калибра соответствовали тому, который был предназначен для использования в экспериментальных исследованиях, этим и обусловлен выбор его размеров и формы.

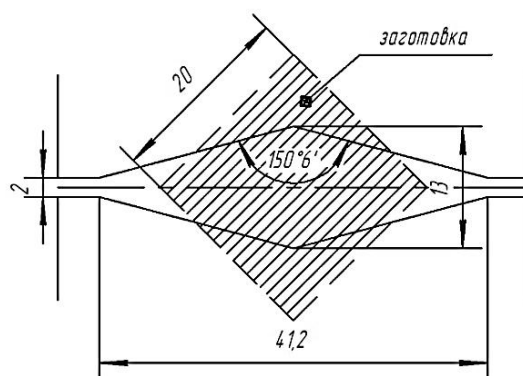


Рис. 2. Ромбический калибр и задаваемый в него профиль

Система «ромб – квадрат» рассмотрена на примере схемы «квадрат-ромб» при прокатке квадратной заготовки в ромбическом калибре. Моделирование по указанной схеме выполнялось для случаев прокатки с различными сочетаниями переднего и заднего натяжения. Исследования проводились для условий рассогласования скоростей переднего, заднего, одновременно переднего и заднего концов полосы. Диапазон относительного рассогласования скоростей (по отношению к прокатке без натяжения) составил 2,5...10 % с кратностью 2,5.

Диапазон изменения коэффициентов вытяжки составил $\lambda = 1,039...1,457$, он является достаточно характерным для данной системы калибров.

ВЫВОДЫ

Выполнено моделирование процесса прокатки квадратной заготовки в ромбическом калибре. Исследованы изменения деформационных и кинематических параметров непрерывной прокатки в зависимости от варьируемых параметров. Выявлены закономерности изменения параметров прокатки во взаимосвязи друг с другом. Выявлен качественный и количественный (для исследованного диапазона параметров) характер изменения параметров прокатки в зависимости от натяжения (рассогласования скоростей). Предварительное сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных позволяют сделать вывод о достаточной их сходимости и возможности использования программы FORCE 3D для решения практических задач, связанных с прокаткой в системе калибров «ромб-квадрат».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Using software product FORGE3 for researching of the special steel broadening / H. Dyja, O. Remez, S. Mroz, A. Samsonenko // *Hutnik. Collection of science papers.* – 2010. – № 5. – P. 225–227.
2. Теоретическое исследование изменения ширины профиля при прокатке специальных сталей в калибрах простой формы с использованием программного продукта FORGE3 / В. Н. Данченко, О. А. Ремез, Sebastian Mroz, A. A. Самсоненко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1(22). – С. 210–217.
3. Investigation of wear of roughing stand's rolls of the section mill at rolling of crane rails / S. Mroz, O. Remez, V. Andreiev, A. Samsonenko, M. Kraev, O. Kuzmina // *HUTNIK. WIADOMOSCI HUTNICZE.* – Tom LXXIX. – 2012. – № 5. – P. 349–352
4. Миленин А. А. Проблемы разработки и применения трехмерных численных моделей для оптимизации процессов прокатки / А. А. Миленин // *Наукові вісті: Сучасні проблеми металургії.* – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 36–46.
5. Modelowanie procesow kucia swobodnego: seria "Metalurgia" / [H. S. Dyja, G. A. Banaszek, V. A. Grynkevych, V. N. Danchenko]. – Czestochowa, 2004. – № 42. – 355 s.
6. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods / Berski S., Dyja H., Milenin A. [ma in.] // *Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. Пластична деформація металів.* – 2002. – Т. 5. – С. 250–254.
7. Миленин А. А. Разработка научных основ и развитие технологий трехмерного пластического формоизменения металлов с применением методов компьютерного моделирования : дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук : 05.03.05 / Миленин Андрей Анатольевич. – Днепропетровск, 2001. – 320 с.
8. Еришов С. В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системе сортовых калибров : дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук : 05.03.05 / Еришов Сергей Владимирович. – Днепродзержинск, 2008. – 301 с.
9. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М. : *Металлургия*, 1970. – 456 с.
10. Онищенко И. И. Теория непрерывной прокатки / И. И. Онищенко, П. И. Куценко, А. И. Куценко. – Запорожье : Изд-во ЗГИА, 1998 – 470 с.
11. Непрерывная прокатка / Кол. моногр. под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Н. Данченко. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 588 с. – ISBN 966-7616-40-1.
12. Чекмарев А. П. Межклетевое натяжение при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, И. А. Чекмарев, А. Я. Семенюта // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов ДМетИ.* – М. : *Металлургия*, 1970. – № 55. – С. 5–7.
13. Предельные значения динамического и кинематического натяжения при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев, А. А. Динник [и др.] // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов ДМетИ.* – М. : *Металлургия*, 1970. – № 55. – С. 7–14.
14. Чекмарев А. П. Деформация полосы в межклетевом пространстве при непрерывной прокатке с натяжением / А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов ДМетИ.* – М. : *Металлургия*, 1965. – № 49. – С. 24–40.
15. Комплексное исследование процесса непрерывной прокатки / [А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко, В. В. Гетманец, М. П. Топоровский] // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов ДМетИ.* – М. : *Металлургия*, 1965. – № 49. – С. 41–73.
16. Мутьев М. С. Исследование процесса прокатки с натяжением / М. С. Мутьев, Л. Н. Левченко, Л. Ф. Машикин // *Обработка металлов давлением : сб. научн. трудов ДМетИ.* – М. : *Металлургия*, 1965. – № 49. – С. 73–87.
17. Динник А. А. Исследование межклетевой деформации полосы на непрерывном проволочном стане / А. А. Динник, Л. Б. Черногоров, А. Н. Комаров // *Обработка металлов давлением : сб. науч. трудов ДМетИ.* – М. : *Металлургия*, 1965. – № 49. – С. 104–110.
18. К вопросу определения межклетевых деформаций при горячей прокатке на непрерывных станах / [В. И. Тарновский, А. А. Поздеев, В. И. Еремеев, А. Г. Криволапов] // *Сборник научных трудов: Челябинский политехнический институт.* – Челябинск, 1968. – № 54. – С. 29–39.
19. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : *Металлургия*, 1982. – 360 с.
20. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов // П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : *Металлургия*, 1976. – 488 с.

REFERENCES

1. Using software product FORGE3 for researching of the special steel broadening / H. Dyja, O. Remez, S. Mroz, A. Samsonenko // *Hutnik. Collection of science papers.* – 2010. – № 5. – R. 225–227.
2. Teoreticheskoe issledovanie izmenenija shiriny profilja pri prokatke special'nyh stalej v ka-librah prostoj formu s ispol'zovaniem programmnoho produkta FORGE3 / V. N. Danchenko, O. A. Remez, Sebastian Mroz, A. A. Samsonenko // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov.* – Kramatorsk : DGMA, 2010. – № 1(22). – S. 210–217.

3. Investigation of wear of roughing stand's rolls of the section mill at rolling of crane rails / S. Mroz, O. Remez, V. Andreiev, A. Samsonenko, M. Kraev, O. Kuzmina // HUTNIK. WIADOMOSCI HUTNICZE. – Tom LXXIX. – 2012. – № 5. – P. 349–352.
4. Milenin A. A. Problemy razrabotki i primenenija trehmernyh chislennyh modelej dlja optimizacii processov prokatki / A. A. Milenin // Naukovi visti: Suchasni problemi metalurgii. – 2002. – T. 5. – № 3. – S. 36–46.
5. Modelowanie procesow kucia swobodnego: seria "Metalurgia" / [H. S. Dyja, G. A. Banaszek, V. A. Grynkewych, V. N. Danchenko]. – Czestochowa, 2004. – № 42. – 355 s.
6. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods / Berski S., Dyja H., Milenin A. [ta in.] // Naukovi visti. Suchasni problemi metalurgii. Plastichna deformacija metaliv. – 2002. – T. 5. – S. 250-254.
7. Milenin A. A. Razrabotka nauchnyh osnov i razvitie tehnologij trehmernogo plasticheskogo formoizmenenija metallov s primeneniem metodov komp'juternogo modelirovanija : dis. na soisk. uch. step. d-ra tehn. nauk : 05.03.05 / Milenin Andrej Anatol'evich. – Dnepropetrovsk, 2001. – 320 s.
8. Ershov S. V. Razvitie teorii naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke krupnyh kruglyh profilej s ponizhennym treshhinoobrazovanijem v sisteme sortovyh kalibrov : dis. na soisk. uch. step. d-ra tehn. nauk : 05.03.05 / Ershov Sergej Vladimirovich. – Dneprodzerzhinsk, 2008. – 301 c.
9. Vydrin V. N. Process nepreryvnoj prokatki / V. N. Vydrin, A. S. Fedosienko, V. I. Krajnov. – M. : Metallurgija, 1970. – 456 s.
10. Onishhenko I. I. Teorija nepreryvnoj prokatki / I. I. Onishhenko, P. I. Kucenko, A. I. Kucenko. – Zaporozh'e : Izd-vo ZGIA, 1998 – 470 s.
11. Nepreryvnaja prokatka / Kol. monogr. pod red. d-ra tehn. nauk, prof. V. N. Danchenko. – Dnipropetrovs'k : RVA «Dnipro-VAL», 2002. – 588 s. – ISBN 966-7616-40-1.
12. Chekmarev A. P. Mezkhkletevoe natjazhenie pri nepreryvnoj prokatke / A. P. Chekmarev, I. A. Chekmarev, A. Ja. Semenjuta // Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov DMetI. – M. : Metallurgija, 1970. – № 55. – S. 5–7.
13. Predel'nye znachenija dinamicheskogo i kinematicheskogo natjazhenija pri nepreryvnoj prokatke / A. P. Chekmarev, V. I. Prokofev, A. A. Dinnik [i dr.] // Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov DMetI. – M. : Metallurgija, 1970. – № 55. – S. 7–14.
14. Chekmarev A. P. Deformacija polosy v mezkhkletevom prostranstve pri nepreryvnoj prokatke s natjazheniem / A. P. Chekmarev, I. I. Onishhenko // Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov DMetI. – M. : Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 24–40.
15. Kompleksnoe issledovanie processa nepreryvnoj prokatki / [A. P. Chekmarev, I. I. Onishhenko, V. V. Getmanec, M. P. Toporovskij] // Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov DMetI. – M. : Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 41–73.
16. Mut'ev M. S. Issledovanie processa prokatki s natjazheniem / M. S. Mut'ev, L. N. Levchenko, L. F. Mashkin // Obrabotka metallov davleniem : sb. nauchn. trudov DMetI. – M. : Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 73–87.
17. Dinnik A. A. Issledovanie mezkhkletevoj deformacii polosy na nepreryvnom provolochnom stane / A. A. Dinnik, L. B. Chernogorov, A. N. Komarov // Obrabotka metallov davleniem : sb. nauch. trudov DMetI. – M. : Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 104–110.
18. K voprosu opredelenija mezkhkletevyh deformacij pri gorjachej prokatke na nepreryvnyh stanah / [V. I. Tarnovskij, A. A. Pozdeev, V. I. Eremeev, A. G. Krivolapov] // Sbornik nauchnyh trudov: Cheljabinskij politehnicheskij institut. – Cheljabinsk, 1968. – № 54. – S. 29–39.
19. Henzel' A. Raschet jenergosilovyh parametrov v processah obrabotki metallov davleniem / A. Henzel', T. Shpittel'. – M. : Metallurgija, 1982. – 360 s.
20. Poluhin P. I. Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallov i splavov // P. I. Poluhin, G. Ja. Gun, A. M. Galkin. – M. : Metallurgija, 1976. – 488 s.

Огинский И. К. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ЗГИА;

Ремез О. А. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

ЗГИА – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

E-mail: remez@metal-forming.org

Статья поступила в редакцию 25.09.2018 г.