

УДК 621.771

Ремез О. А.
Огинский И. К.
Кузьмина О. М.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ В КАЛИБРАХ СИСТЕМЫ «ОВАЛ-КРУГ»

Система калибров «овал-круг» применяется в сортопрокатном производстве в числе других вытяжных систем при прокатке углеродистых и специальных сталей. Технологические основы разработки названных систем были заложены достаточно давно, в основном для их создания были использованы экспериментальные методы. Теоретические методы появились и получили свое развитие несколько позже, и продолжают развиваться исследователями до настоящего времени [1–16 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 дополнительную информацию, однако они не являются достаточными для использования в практических целях. Не все программные средства являются хорошо адаптированными для практических задач. Некоторые программные пакеты по своему замыслу являются специализированными для решения задач сортовой прокатки [17, 18], но и они 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 методов исследования кинематических параметров непрерывной сортовой прокатки с помощью компьютерного моделирования и определение на этой основе закономерностей изменения технологических параметров деформации заготовки в системе вытяжных калибров «овал-круг».

Исследование параметров прокатки в калибрах системы «овал-круг» проводилось с использованием конечно-элементной программы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением FORGE 3D, разработанной компанией TRANSVALOR S. A. FORGE 3D. Программа компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением FORGE 3D использовалась при совместных научно-исследовательских работах между НМетАУ и Ченстаховским политехническим институтом (Польша, договор №М/133-2009 от 30 марта 2009 г.). Программа предназначена для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением в достаточно широкой постановке относительно кинематики и условий трения металла и инструмента.

Расчет формоизменения, полей напряжений, степени деформации и температур основан на минимизации функционала вариационного принципа Лагранжа, сформулированного 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 (химический состав регламентируется ГОСТ 5632–72). Эта сталь относится к числу тех, что обладают склонностью к повышенному уширению. Названная особенность изучена в недостаточной степени, и по этой причине возникают трудности при разработке режимов обжатий. Указанные стали содержатся в марочном сорimente заводов, работающих со специальными марками, и представляют практический интерес.

Результаты моделирования (табл. 1–3) были предназначены, в частности, для использования в экспериментальных исследованиях. Индексы и символы «Б/н» относятся к прокатке без натяжения, «Н» – к прокатке с натяжением. Обозначения 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 эта величина составляет $h_1 = 2$ 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, используется заготовка круглого сечения диаметром 30,5 мм, диаметр валков по дну калибра – 194 мм.

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

Таблица 1

Результаты моделирования процесса прокатки по схеме «круг-овал» с задним натяжением

h ₁ , мм	F ₁ , мм ²			b ₁ , мм			ΔB, мм		λ			V ₀ /V _{0H}	V _{1H} /V ₁	Δb _n /Δb	λ _n /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Б	Н	Δ, %				
16,71	549,17	539,96	-1,706	37,42	36,64	-2,130	6,92	6,14	1,327	1,349	1,677	1,025	0,997	0,887	1,017
18,71	589,60	581,48	-1,397	35,84	35,34	-1,420	5,34	4,84	1,236	1,253	1,378	1,025	0,994	0,906	1,014
20,31	616,76	608,92	-1,288	34,67	34,18	-1,414	4,17	3,68	1,181	1,197	1,271	1,025	0,995	0,884	1,013
23,30	661,46	653,46	-1,224	32,81	32,47	-1,055	2,31	1,97	1,101	1,115	1,209	1,025	0,995	0,852	1,012
24,14	672,09	665,51	-0,989	32,39	32,08	-0,966	1,89	1,58	1,084	1,095	0,979	1,025	0,993	0,836	1,010
25,23	684,79	676,68	-1,198	31,85	31,53	-1,017	1,35	1,03	1,064	1,077	1,184	1,025	0,990	0,763	1,012
26,43	698,41	690,84	-1,095	31,37	31,10	-0,868	0,87	0,60	1,043	1,055	1,084	1,025	0,987	0,690	1,011
16,71	549,17	531,80	-3,266	37,42	36,03	-3,866	6,92	5,53	1,327	1,370	3,163	1,050	0,993	0,799	1,033
18,71	589,60	572,62	-2,966	35,84	34,79	-3,026	5,34	4,29	1,236	1,272	2,881	1,050	0,990	0,803	1,030
20,31	616,76	600,47	-2,713	34,67	33,73	-2,781	4,17	3,23	1,181	1,213	2,641	1,050	0,988	0,775	1,027
23,30	661,46	644,36	-2,654	32,81	32,04	-2,409	2,31	1,54	1,101	1,131	2,586	1,050	0,986	0,666	1,027
24,14	672,09	657,90	-2,157	32,39	31,76	-1,980	1,89	1,26	1,084	1,107	2,111	1,050	0,986	0,668	1,022
25,23	684,79	671,65	-1,956	31,85	31,33	-1,661	1,35	0,83	1,064	1,085	1,919	1,050	0,975	0,616	1,020
26,43	698,41	685,90	-1,823	31,37	30,91	-1,493	0,87	0,41	1,043	1,062	1,790	1,050	0,971	0,470	1,018
16,71	549,17	525,02	-4,600	37,42	35,68	-4,880	6,92	5,18	1,327	1,388	4,398	1,075	0,986	0,749	1,046
18,71	589,60	563,66	-4,602	35,84	34,27	-4,601	5,34	3,77	1,236	1,293	4,400	1,075	0,984	0,705	1,046
20,31	616,76	599,78	-2,830	34,67	33,66	-2,999	4,17	3,16	1,181	1,215	2,752	1,075	0,984	0,758	1,028
23,30	661,46	639,31	-3,464	32,81	31,82	-3,098	2,31	1,32	1,101	1,140	3,348	1,075	0,979	0,573	1,035
24,14	672,09	649,53	-3,473	32,39	31,39	-3,193	1,89	0,89	1,084	1,122	3,357	1,075	0,965	0,470	1,035
25,23	684,79	664,02	-3,127	31,85	31,01	-2,709	1,35	0,51	1,064	1,097	3,032	1,075	0,955	0,379	1,031
26,43	698,41	683,12	-2,237	31,37	30,80	-1,839	0,87	0,30	1,043	1,067	2,188	1,075	0,958	0,349	1,022
16,71	549,17	522,44	-5,116	37,42	35,49	-5,461	6,92	4,99	1,327	1,395	4,867	1,100	0,982	0,720	1,051
18,71	589,60	560,73	-5,150	35,84	34,10	-5,123	5,34	3,60	1,236	1,299	4,898	1,100	0,975	0,673	1,051
20,31	616,76	585,52	-5,335	34,67	32,94	-5,234	4,17	2,44	1,181	1,244	5,065	1,100	0,974	0,586	1,053
23,30	661,46	634,31	-4,281	32,81	31,57	-3,919	2,31	1,07	1,101	1,149	4,105	1,100	0,961	0,464	1,043
24,14	672,09	644,95	-4,208	32,39	31,23	-3,714	1,89	0,73	1,084	1,130	4,038	1,100	0,946	0,387	1,042
25,23	684,79	660,16	-3,731	31,85	30,85	-3,252	1,35	0,35	1,064	1,104	3,597	1,100	0,936	0,259	1,037
26,43	698,41	680,26	-2,668	31,37	30,69	-2,232	0,87	0,19	1,043	1,071	2,599	1,100	0,928	0,214	1,027

Таблица 2

Результаты моделирования процесса прокатки по схеме «круг-овал» с передним натяжением

h ₁ , мм	F ₁ , мм ²			b ₁ , мм			ΔB, мм		λ			V ₀ /V _{0н}	V _{1н} /V ₁	Δb _н /Δb	λ _н /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Б	Н	Δ, %				
16,71	549,17	543,10	-1,117	37,42	37,04	-1,033	6,92	6,54	1,327	1,342	1,104	0,991	1,025	0,945	1,011
18,71	589,60	582,76	-1,174	35,84	35,44	-1,138	5,34	4,94	1,236	1,250	1,160	0,991	1,025	0,924	1,012
20,31	616,76	610,13	-1,086	34,67	34,30	-1,074	4,17	3,80	1,181	1,194	1,075	0,994	1,025	0,912	1,011
23,30	661,46	655,87	-0,852	32,81	32,60	-0,651	2,31	2,10	1,101	1,111	0,845	0,986	1,025	0,908	1,009
24,14	672,09	666,30	-0,869	32,39	32,16	-0,708	1,89	1,66	1,084	1,093	0,861	0,986	1,025	0,880	1,009
25,23	684,79	680,79	-0,587	31,85	31,69	-0,528	1,35	1,19	1,064	1,070	0,584	0,977	1,025	0,876	1,006
26,43	698,41	693,68	-0,681	31,37	31,21	-0,502	0,87	0,71	1,043	1,050	0,676	0,978	1,025	0,820	1,007
16,71	549,17	538,10	-2,058	37,42	36,59	-2,282	6,92	6,09	1,327	1,354	2,016	0,970	1,050	0,879	1,021
18,71	589,60	576,39	-2,293	35,84	35,10	-2,127	5,34	4,60	1,236	1,264	2,242	0,976	1,050	0,860	1,023
20,31	616,76	604,27	-2,067	34,67	34,02	-1,887	4,17	3,52	1,181	1,206	2,025	0,972	1,050	0,846	1,021
23,30	661,46	650,62	-1,665	32,81	32,38	-1,317	2,31	1,88	1,101	1,120	1,638	0,970	1,050	0,815	1,017
24,14	672,09	663,04	-1,364	32,39	32,00	-1,233	1,89	1,50	1,084	1,099	1,346	0,966	1,050	0,792	1,014
25,23	684,79	677,98	-1,004	31,85	31,57	-0,896	1,35	1,07	1,064	1,075	0,994	0,961	1,050	0,791	1,010
26,43	698,41	691,81	-0,954	31,37	31,13	-0,786	0,87	0,63	1,043	1,053	0,945	0,958	1,050	0,719	1,010
16,71	549,17	532,91	-3,051	37,42	36,22	-3,322	6,92	5,72	1,327	1,367	2,961	0,967	1,075	0,826	1,031
18,71	589,60	570,52	-3,344	35,84	34,78	-3,056	5,34	4,28	1,236	1,277	3,236	0,972	1,075	0,801	1,033
20,31	616,76	599,08	-2,952	34,67	33,71	-2,832	4,17	3,21	1,181	1,216	2,867	0,965	1,075	0,771	1,030
23,30	661,46	646,67	-2,287	32,81	32,20	-1,880	2,31	1,70	1,101	1,127	2,236	0,953	1,075	0,738	1,023
24,14	672,09	659,36	-1,930	32,39	31,85	-1,700	1,89	1,35	1,084	1,105	1,894	0,948	1,075	0,714	1,019
25,23	684,79	674,47	-1,530	31,85	31,46	-1,255	1,35	0,96	1,064	1,080	1,507	0,944	1,075	0,708	1,015
26,43	698,41	690,26	-1,180	31,37	31,08	-0,945	0,87	0,58	1,043	1,056	1,166	0,937	1,075	0,663	1,012
16,71	549,17	529,86	-3,644	37,42	36,08	-3,727	6,92	5,58	1,327	1,375	3,516	0,960	1,100	0,806	1,036
18,71	589,60	565,24	-4,311	35,84	34,47	-3,974	5,34	3,97	1,236	1,289	4,133	0,956	1,100	0,744	1,043
20,31	616,76	594,06	-3,821	34,67	33,48	-3,542	4,17	2,98	1,181	1,226	3,681	0,951	1,100	0,715	1,038
23,30	661,46	642,18	-3,002	32,81	32,04	-2,389	2,31	1,54	1,101	1,135	2,915	0,938	1,100	0,669	1,030
24,14	672,09	655,63	-2,510	32,39	31,71	-2,144	1,89	1,21	1,084	1,111	2,448	0,938	1,100	0,641	1,025
25,23	684,79	672,67	-1,801	31,85	31,38	-1,525	1,35	0,88	1,064	1,083	1,769	0,923	1,100	0,647	1,018
26,43	698,41	689,41	-1,305	31,37	31,03	-1,103	0,87	0,53	1,043	1,057	1,288	0,920	1,100	0,607	1,013

Таблица 3

Результаты моделирования процесса прокатки по схеме «круг-овал» с передним и задним натяжением

h ₁ , мм	F ₁ , мм ²			b ₁ , мм			ΔB, мм		λ			V ₀ /V _{0н} = = V _{1н} /V ₁	Δb _н /Δb	λ _н /λ
	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Δ, %	Б	Н	Б	Н	Δ, %			
16,71	549,17	523,03	-4,997	37,42	35,59	-5,148	6,92	5,09	1,327	1,393	4,759	1,025	0,735	1,050
18,71	589,60	562,64	-4,793	35,84	34,17	-4,883	5,34	3,67	1,236	1,295	4,574	1,025	0,688	1,048
20,31	616,76	587,45	-4,989	34,67	33,15	-4,571	4,17	2,65	1,181	1,240	4,752	1,025	0,636	1,050
23,30	661,46	630,64	-4,887	32,81	31,44	-4,363	2,31	0,94	1,101	1,155	4,659	1,025	0,406	1,049
24,14	672,09	640,37	-4,953	32,39	30,97	-4,604	1,89	0,47	1,084	1,138	4,720	1,025	0,246	1,050
25,23	684,79	649,08	-5,501	31,85	30,42	-4,724	1,35	-0,08	1,064	1,122	5,214	1,025	-0,061	1,055
26,43	698,41	664,27	-5,139	31,37	30,08	-4,290	0,87	-0,42	1,043	1,097	4,888	1,025	-0,482	1,051
16,71	549,17	497,25	-10,441	37,42	33,81	-10,695	6,92	3,31	1,327	1,465	9,454	1,050	0,478	1,104
18,71	589,60	534,48	-10,314	35,84	32,52	-10,216	5,34	2,02	1,236	1,363	9,349	1,050	0,378	1,103
20,31	616,76	559,50	-10,235	34,67	31,58	-9,786	4,17	1,08	1,181	1,302	9,285	1,050	0,258	1,102
23,30	661,46	600,91	-10,077	32,81	30,20	-8,641	2,31	-0,30	1,101	1,212	9,154	1,050	-0,130	1,101
24,14	672,09	611,15	-9,971	32,39	29,90	-8,328	1,89	-0,60	1,084	1,192	9,067	1,050	-0,316	1,100
25,23	684,79	617,22	-10,947	31,85	29,35	-8,518	1,35	-1,15	1,064	1,180	9,867	1,050	-0,847	1,109
26,43	698,41	635,29	-9,936	31,37	29,24	-7,298	0,87	-1,26	1,043	1,147	9,038	1,050	-1,450	1,099
16,71	549,17	476,63	-15,218	37,42	32,47	-15,239	6,92	1,97	1,327	1,529	13,208	1,075	0,285	1,152
18,71	589,60	510,52	-15,490	35,84	31,23	-14,779	5,34	0,73	1,236	1,427	13,412	1,075	0,136	1,155
20,31	616,76	534,98	-15,287	34,67	30,37	-14,138	4,17	-0,13	1,181	1,362	13,260	1,075	-0,031	1,153
23,30	661,46	575,64	-14,909	32,81	29,21	-12,323	2,31	-1,29	1,101	1,266	12,974	1,075	-0,558	1,149
24,14	672,09	583,70	-15,142	32,39	28,95	-11,879	1,89	-1,55	1,084	1,248	13,151	1,075	-0,818	1,151
25,23	684,79	593,58	-15,366	31,85	28,55	-11,584	1,35	-1,95	1,064	1,227	13,319	1,075	-1,442	1,154
26,43	698,41	611,56	-14,201	31,37	28,58	-9,759	0,87	-1,92	1,043	1,191	12,435	1,075	-2,203	1,142
16,71	549,17	494,19	-11,124	37,42	33,44	-11,899	6,92	2,94	1,327	1,474	10,011	1,100	0,425	1,111
18,71	589,60	494,41	-19,255	35,84	30,38	-17,989	5,34	-0,12	1,236	1,474	16,146	1,100	-0,023	1,193
20,31	616,76	513,30	-20,156	34,67	29,41	-17,877	4,17	-1,09	1,181	1,419	16,775	1,100	-0,262	1,202
23,30	661,46	552,94	-19,625	32,81	28,36	-15,679	2,31	-2,14	1,101	1,318	16,406	1,100	-0,925	1,196
24,14	672,09	563,40	-19,291	32,39	28,17	-14,969	1,89	-2,33	1,084	1,293	16,171	1,100	-1,229	1,193
25,23	684,79	574,27	-19,245	31,85	27,95	-13,954	1,35	-2,55	1,064	1,269	16,139	1,100	-1,881	1,192
26,43	698,41	592,53	-17,868	31,37	27,97	-12,169	0,871	-2,5326	1,043	1,230	15,160	1,100	-2,908	1,179

Форма и размеры овального калибра, а также задаваемой в него круглой заготовки, представлены на рис. 2. Форма и размеры калибра выбирались исходя из условий экспериментальных исследований.

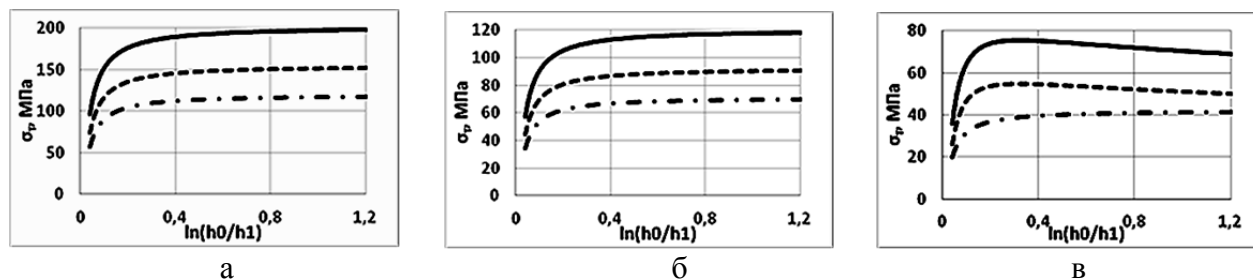


Рис. 1. Реологические зависимости стали 08X13:

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

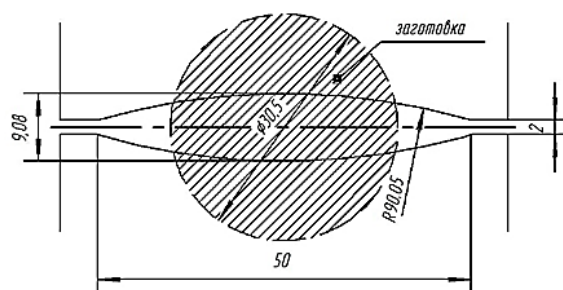


Рис. 2. Овальный калибр и задаваемый в него профиль

Система «овал – круг» рассмотрена на примере схемы «круг-овал» при прокатке круглой заготовки в овальном 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 $\lambda = 1,043...1,529$, он является достаточно характерным для данной системы калибров.

Установлено, что при малых значениях коэффициента вытяжки и значительном рассогласовании скоростей в условиях одновременного действия переднего и заднего натяжения в исследованных системах калибров может происходить утяжка профиля (возникает отрицательное уширение).

Полученные данные носят информационный характер и могут быть использованы для проектирования и разработки режима деформации при прокатке специальных сталей и сталей, склонных к повышенному уширению, в системе калибров «овал-круг».

ВЫВОДЫ

Выполнено моделирование процесса прокатки круглой заготовки в овальном 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 позволяет сделать вывод о достаточной их сходимости и возможности использования программы FORGE 3D для решения практических задач, связанных с прокаткой в системе калибров «овал-круг».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dyja H. 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. Данченко В. Н. 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, А. А. Самсоненко // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1(22). – С. 210–217.
3. Mroz S. 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. – № 5. – 2012 – 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. – Nr 42 – 355 s.
6. Strain and stress analysis in forward extrusion process of bimetallic rods / Berski S., Dyja H., Milenin A. [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: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.03.05 / Андрей Анатольевич Миленин. – Днепропетровск, 2001. – 320 с.
8. Ершов С. В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системе сортовых калибров: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.03.05 / Ершов Сергей Владимирович. – Днепро-дзержинск, 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. монограф. под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Н. Данченко. – Днепропетровськ : 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 : сборник научных 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: сборник научных 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.* – Челябинск : Челябинский политехнический институт, 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. Dyja H. 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. Danchenko V. N. Teoreticheskoe issledovanie izmenenija shiriny profilja pri prokatke special'nyh stalej v kalibrah prostoj formy 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. Mroz S. 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. – № 5. – 2012 – 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. Grynkevych, V. N. Danchenko]. – Czestochowa, 2004. – Nr 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: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniczeskih nauk : 05.03.05 / Andrej Anatol'evich Milenin. – Dnepropetrovsk, 2001. – 320 s.
8. Ershov S. V. Razvitie teorii naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke kruglyh profilej s ponizhennym treshhinoobrazovanjem v sisteme sortovyh kalibrov: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniczeskih nauk : 05.03.05 / Ershov Sergej Vladimirovich. – Dneprodzerzhinsk, 2008. – 301 s.
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. monograf. 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. Mezhkletevoe 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 dinamiceskogo i kinematiceskogo natjazhenija pri nepreryvnoj prokatke / A. P. Chekmarev, V. I. Prokof'ev, A. A. Dinnik [i dr.] // *Obrabotka metallov davleniem : sbornik nauchnyh trudov DMetI*. – M. : Metallurgija, 1970. – № 55. – S. 7–14.
14. Chekmarev A. P. Deformacija polosity v mezhkletevom 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 : sbornik nauchnyh trudov DMetI*. – M. : Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 73–87.
17. Dinnik A. A. Issledovanie mezhkletevoj deformacii polosity na nepreryvnom provolochnom stane / A. A. Dinnik, L. B. Chernogorov, A. N. Komarov // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI*. – M. : Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 104–110.
18. K voprosu opredelenija mezhkletevyh deformacij pri gorjachej prokatke na nepreryvnyh stanah / [V. I. Tarnovskij, A. A. Pozdeev, V. I. Eremeev, A. G. Krivolapov] // *Sbornik nauchnyh trudov*. – Cheljabinsk : Cheljabinskij politehnicheskij institut, 1968. – № 54. – S. 29–39.
19. Henzel' A. Raschet jenergossilovyh 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.

Ремез О. А. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД НМетАУ;

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

Кузьмина О. М. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД НМетАУ.

ЗГИА – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

E-mail: remez@metal-forming.org