

МКЭ-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ. АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

FEM MODELING HEAVY PLATE ROLLING. ANALYSIS OF NON-UNIFORM STRESS-STRAIN STATE IN THE DEFORMATION

А.А. Богатов, Д.Ш. Нухов, К.П. Пьянков

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» (г. Екатеринбург)
danis_nuchov@mail.ru

Abstract

In recent years hot-rolled plate has more actively applied for shipbuilding, production of gas pipes of large diameters and other types of important products. In this respect the topic of high quality of products is getting more relevant. It can be ensured first of all by means of increasing the structural depressiveness, endurance, plasticity and fracture toughness of metal. In order to attain the set objectives it is necessary to ensure equal distribution of deformation within the whole section of the strip and welding of micro pores which exist in cast metal. According to the theory of rolling, parameters of stressed and strained states are determined based on the strip section on average. Modern modeling software FEM (Fine element method) allows to more precisely calculate the degree of shear deformation Λ , stressed state parameters σ and μ_σ , and also to estimate workup of the cast metal structure during deformation.

Введение

В последние годы возросло применение толстолистого проката для судостроения, производства газопроводных труб большого диаметра и других видов ответственной продукции. В связи с этим актуальными становятся вопросы обеспечения повышения дисперсности структуры, прочности, пластичности и вязкости разрушения металла. В работе представлены результаты исследования неравномерности деформации по толщине листа в зависимости от размеров очага деформации. Проведена оценка напряженного состояния металла в очаге деформации с использованием современных средств МКЭ – моделирования, а также по известным методам теории прокатки.

1. Анализ неоднородности деформации при толстолистной прокатке в программах DEFORM-3D и Q-FORM

Анализ выполнялся с помощью программ DEFORM-3D и Q-FORM для первого, тринадцатого и двадцать первого проходов таблицы прокатки стана 5000 ОАО «ММК». Результаты расчетов размеров очага деформации, положения нейтрального сечения, степени деформации сдвига для девяти частиц, имеющих различную высотную координату $0 \leq \frac{2y}{h_0} \leq 1$ программ DEFORM-3D и Q-FORM сравнивали с аналогичными характеристиками, полученными с известными в теории листовой прокатки формулами [1,2,3]. Степень деформации сдвига, определенную по конечному изменению размеров листа подсчитали по формуле $\Lambda_0 = 2\sqrt{\bar{\epsilon}_1^2 + \bar{\epsilon}_1 \cdot \bar{\epsilon}_3 + \bar{\epsilon}_3^2}$, где $\bar{\epsilon}_1 = \ln \frac{h_0}{h_1}$; $\bar{\epsilon}_3 = \ln \frac{b_0}{b_1}$. Если уширение отсутствует, то $\Lambda_0 = 2\ln \frac{h_0}{h_1}$. Для оценки неравномерности деформации по высоте листа выполнен расчет

накопленной степени деформации сдвига частицами по девяти траекториям: P1 – траектория частицы вдоль контакта с валком ($z=h/2$); P9 – траектория частицы по плоскости симметрии ($z=h/2$).

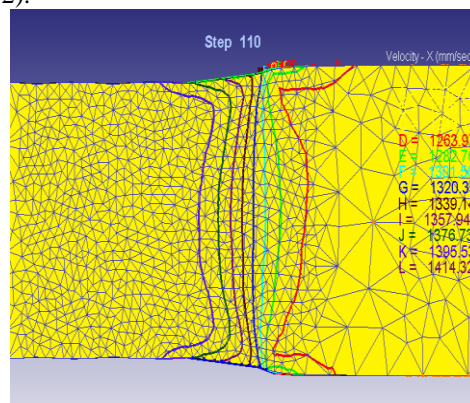


Рис.1. – Распределения изолиний осевой составляющей скорости металла

Среднее значение степени деформации сдвига по высоте $\Lambda_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Lambda_i$, i – номер траектории частицы, $n=8,5$. Неравномерность деформации по высоте листа можно оценить с помощью коэффициента вариации S/Λ_{cp} , где $S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Lambda_i - \Lambda_{cp})^2 \right]^{1/2}$ – среднее квадратичное отклонение. Результаты расчетов для трех, указанных выше проходов прокатки, представлены в табл. 1 и 2, а также на рис. 2а,б. Отметим, что для тринадцатого прохода расчеты были выполнены для трех различных условий трения $\psi=0,6; 0,7; 0,8$, а для первого и двадцать первого проходов – $\psi=0,8$, где ψ – показатель трения. Из табл.1 видно, что расчет геометрических параметров очага деформации $l, l/h_{cp}, a, \gamma_n$ с помощью программ DEFORM-3D и Q-FORM дает одинаковый результат с расчетом их по известным в теории

прокатке формулам. Относительное уширение сляба в первом проходе составляет $\frac{\Delta B}{B_0} \cdot 100 = 0,87\%$ и $0,89\%$ по программам DEFORM-3D и Q-FORM соответственно, заготовки в тринадцатом –

$\frac{\Delta B}{B_0} \cdot 100 = 0,13\%$ и $0,11\%$, в двадцать первом – $\frac{\Delta B}{B_0} \cdot 100 = 0,05\%$ и $0,07\%$, поэтому в инженерных расчетах уширением пренебрегают.

Таблица 1

Результаты математического моделирования

№ прохода	Метод расчета	Dв, мм	n, об/мин	Δh_i , мм	ψ	T, °C	l, мм	l/h _{ср}	B ₀ , мм	B ₁ , мм	ΔB , мм	α , °	γ , °	l _{оп} , мм	$\Lambda_{ср}$	Λ_0
1	DEFORM-3D	1110	23,7	36	0,8	1172	139,90	0,49	2700	2723,46	23,46	14,61	5,65	54,41	0,320	0,256
	Q-FORM	1110	23,7	36	0,8	1172	143,15	0,54	2700	2724,07	24,07	15,10	4,26	40,85	0,310	
	Теория прокатки	1110	23,7	36	0,8	1172	140,71	0,49	2700	2706,33	6,33	14,66	5,94	50,67		
13	DEFORM-3D	1110	63,1	6,5	0,8	890	59,17	0,92	4490	4495,87	5,87	6,25	2,87	27,62	0,222	0,203
	Q-FORM	1100	63,1	6,5	0,8	890	65,62	0,94	4490	4494,83	4,83	6,85	1,83	20,61	0,226	
	Теория прокатки	1110	63,1	6,5	0,8	890	59,79	0,93	4490	4492,64	2,64	6,23	2,86	27,51		
21	DEFORM-3D	1110	96,2	2,8	0,8	868	39,50	1,36	4490	4492,10	2,10	4,10	1,96	18,87	0,213	0,193
	Q-FORM	1100	96,2	2,8	0,8	868	43,02	1,48	4490	4493,3	3,3	1,48	2,21	21,79	0,225	
	Теория прокатки	1110	96,2	2,8	0,8	868	39,24	1,35	4490	4491,61	1,61	4,08	1,94	18,59		
13	DEFORM-3D	1110	63,1	6,5	0,7	890	59,17	0,92	4490	4494,15	4,15	6,25	2,84	27,28	0,220	0,203
	Q-FORM	1110	63,1	6,5	0,7	890	64,7	1,01	4490	4494,24	4,24	6,76	1,90	21,84	0,227	
	Теория прокатки	1110	63,1	6,5	0,7	890	59,79	0,93	4490	4492,59	2,59	6,23	2,84	27,26		
13	DEFORM-3D	1100	63,1	6,5	0,6	890	59,17	0,92	4490	4493,97	3,97	6,25	2,80	26,91	0,219	0,203
	Q-FORM	1100	63,1	6,5	0,6	890	65,23	1,02	4490	4493,95	3,95	6,81	2,15	23,67	0,233	
	Теория прокатки	1110	63,1	6,5	0,6	890	59,79	0,93	4490	4492,53	2,53	6,23	2,79	26,85		

На рис.2а,б представлены расчеты степени деформации сдвига по девяти траекториям частиц, а в на рис.3а,б – значения коэффициента вариации

$S/\Lambda_{ср}$, который характеризует неравномерность степени деформации сдвига по высоте.

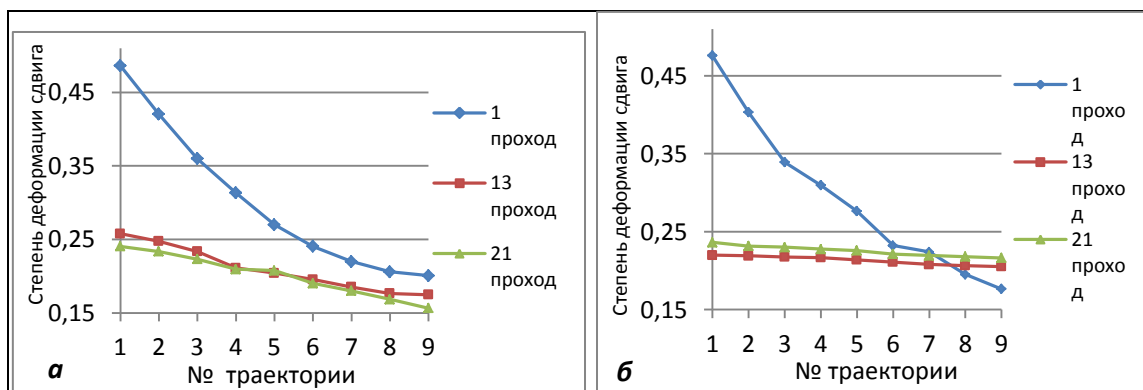


Рис.2. – Графики распределения накопленной степени деформации сдвига по программам DEFORM-3D (а) и Q-FORM (б)

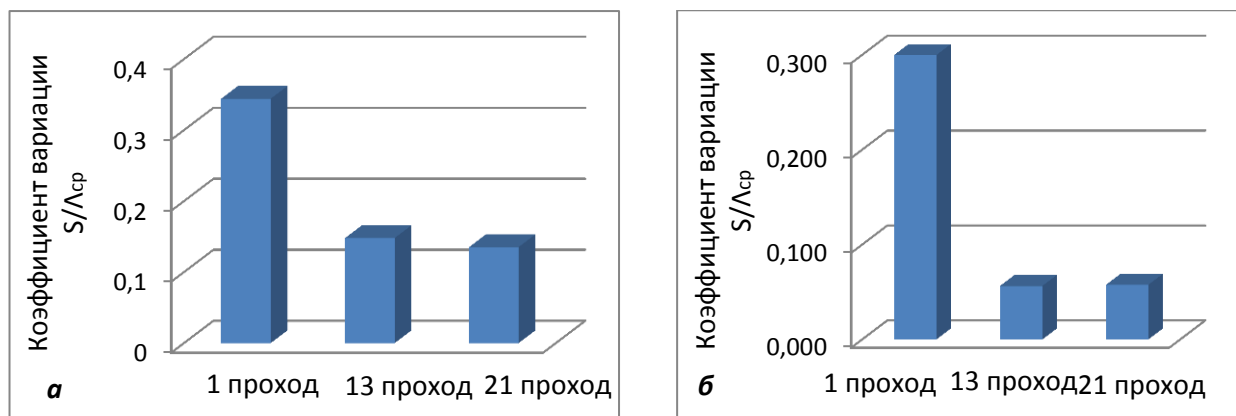


Рис.3 – Коэффициент вариации S/Λ_{cp} для трех проходов по программам DEFORM-3D (а) и Q-FORM (б)

Для тринадцатого ($l/h_{cp} \approx 0,9$) и двадцать первого ($l/h_{cp} \approx 1,35 \div 1,48$) это отношение равно $1,10 \div 1,5$, а коэффициент вариации $0,13$ и $0,12$ по DEFORM-3D и $0,05$ для обоих проходов по Q-FORM. Сравнение результатов расчетов среднего значения степени деформации сдвига по высоте Λ_{cp} , выполненные по программам DEFORM-3D и Q-FORM и по формуле $\Lambda_0 = 2 \ln \frac{h_0}{h_1}$, свидетельствуют о том, что расчеты по формуле дают заниженный результат, однако применимы для инженерных расчетов.

2. Оценка напряженного состояния в очаге деформации при толстолистовой прокатке

Следующим этапом исследования была оценка напряженного состояния в очаге деформации при прокатке листа для трех проходов: первого, тринадцатого и двадцать первого; для тринадцатого прохода изучали процесс с показателями трения $\psi = 0,8; 0,7$ и $0,6$. Согласно теории прокатки при обжатии листа реализуется плоское деформированное состояние, при котором $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = 0, \sigma_{yy} - \sigma = 0$. Так как среднее нормальное напряжение равно $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$, то $\sigma_{yy} = (\sigma_{xx} + \sigma_{zz})/2 = \sigma$. Для плоского деформированного состояния условие пластичности имеет вид $\sigma_{11} - \sigma_{33} = 1,15\sigma_s = 2\tau_s$. Применяя инженерный метод, воспользовались следующими допущениями: $\sigma_{xx} = -\sigma_{11}$ и $\sigma_{xx} = -\sigma_{33} = -p$, где p – контактное давление [4]. Контактное давление определялось по следующим формулам [3]:

для зоны отставания

$$p = \frac{2\tau_s}{\mu} \cdot tg\alpha/2 \cdot \left[(\delta - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^{\frac{\mu}{tg\alpha/2}} + 1 \right];$$

для зоны опережения

$$p = \frac{2\tau_s}{\mu} \cdot tg\alpha/2 \cdot \left[(\delta + 1) \left(\frac{h_x}{h_1} \right)^{\frac{\mu}{tg\alpha/2}} - 1 \right],$$

где μ – коэффициент трения; h_0, h_1 и h_x – начальная, конечная и текущая толщина прокатываемого листа. Применяя условия идеальной пластичности $T = \tau_s$, показатель напряженного состояния был определен следующим образом $\frac{\sigma}{T} = \frac{\sigma}{\tau_s} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{zz}}{2\tau_s} = -\frac{p}{\tau_s} + 1$. Определив по формулам (1) и (2) контактное давление, были определены показатели напряженного состояния металла для одиннадцати сечений вдоль всего очага деформации, результаты представлены на графике (рис.4). Сопротивление деформации σ_s было определено по кривым упрочнения [5], учитывающие температурно-скоростные условия прокатки для разных проходов (см. табл.1). Как показали теоретические расчеты, показатель напряженного состояния имеет минимум в нейтральном сечении; для последнего прохода $-\frac{\sigma}{T} = -2,71$ и максимален для первого прохода $-\frac{\sigma}{T} = -1,4$ в нейтральных сечениях. При уменьшении показателя трения в тринадцатом проходе происходит незначительное увеличение показателя трения (с $-2,11$ до $-1,91$).

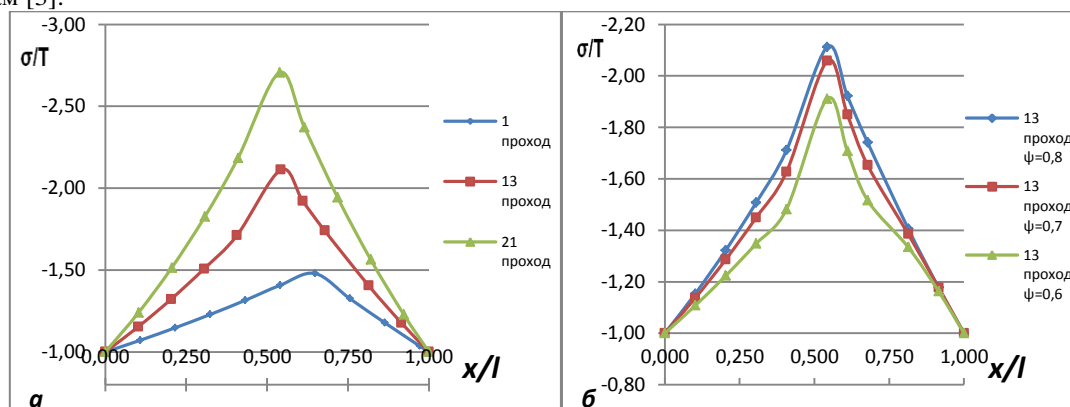


Рис.4 – Распределение показателей напряженного состояния σ/T вдоль очага деформации x/l (а) для трех проходов прокатки и для одного прохода с разными показателями трения (б)

Решением задач МКЭ – моделирования процесса толстолистовой прокатки для трех проходов (первого, тринадцатого и двадцать первого) в программах DEFORM-3D для оценки напряженного состояния были определены показатель напряженного состояния σ/T и коэффициент Лоде μ_σ в очаге деформации для сечений входа, выхода и нейтрального сечения вдоль траекторий изолиний осевой скорости

металла (см. рис. 1). Графики изменение показателя напряженного состояния для пяти траекторий вдоль очага деформации представлены на рис.5 и рис.6. Значения коэффициента Лоде, определенные по программе DEFORM-3D ($\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} - 1$), близки к 0 и имеют значения от 0,01 до 0,09, что согласуется с теорией – при прокатке листа имеет место плоская деформация ($\mu_\sigma = 0$).

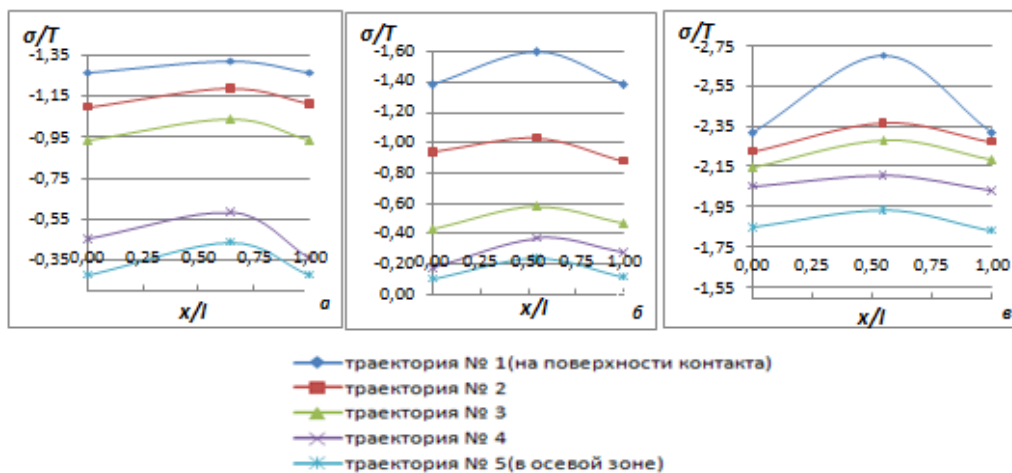


Рис.5. – Показатель напряженного состояния σ/T вдоль очага деформации x/l для трех проходов прокатки при $\psi = 0,8$ по программе DEFORM-3D:

a – первый проход; b – тринадцатый проход; v – двадцать первый проход

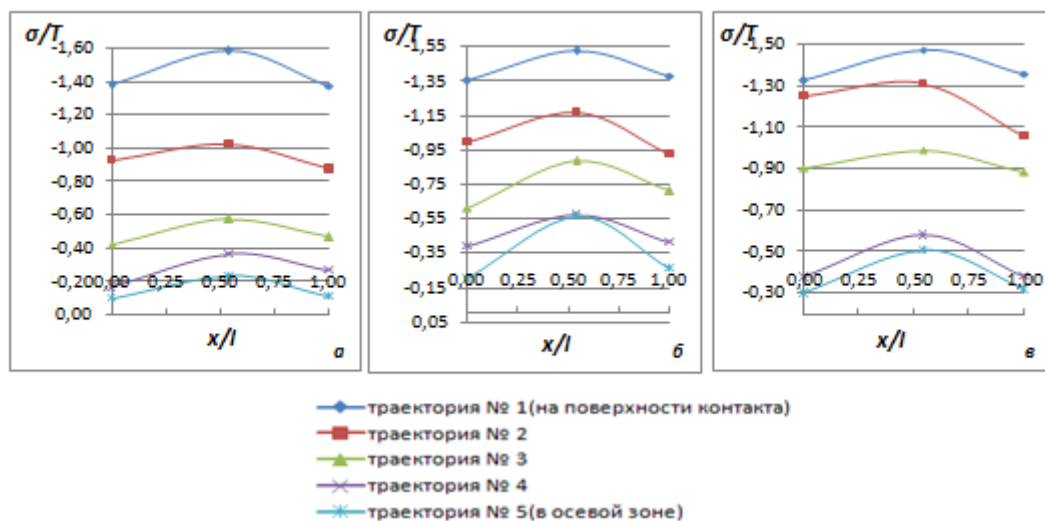


Рис. 6. – Показатели напряженного состояния σ/T вдоль очага деформации x/l для тринадцатого прохода прокатки по программе DEFORM-3D при показателях трения:

$a - \psi = 0,8$; $б - \psi = 0,7$; $в - \psi = 0,6$

Графики на рис.5 и рис.6 показывают, что показатель напряженного состояния имеет минимальное значение в нейтральном сечении и изменяется в пределах от -1,24 – для первого прохода и до -2,74 – для двадцать первого прохода. Кроме того σ/T на поверхности контакта имеет минимальное значение (траектория №1), а в осевой зоне увеличивается, особенно при прокатке в первом и тринадцатом проходах, где σ/T в приконтактной и осевой зоне отличается на 1,10 и 1,5 соответственно (для $\psi=0,8$) (см. рис. 5а,б, рис.6а,б,в). Таким образом, оценка напряженного состояния в очаге деформации при толстолистовой

прокатке, выполненная с использованием современных программных комплексов МКЭ-моделирования, показала, что имеет место значительная неоднородность показателя напряженного состояния.

Выводы

Благодаря исследованию процесса толстолистовой прокатки при помощи современных программных комплексов математического моделирования были рассчитаны размеры очага деформации и поле скоростей при прокатке. Полученные данные не противоречат

результатам расчета по известным формулам теории прокатки.

Новым результатом является разработка критерия неоднородности деформации в виде коэффициента вариации S/A_{cp} . Результаты расчетов S/A_{cp} в программах DEFORM-3D и Q-FORM дали следующие результаты: для первого прохода $S/A_{cp} = 0,315$ и $0,3$; для тринадцатого прохода $S/A_{cp} = 0,136$ и $0,056$; для двадцать первого прохода $S/A_{cp} = 0,122$ и $0,058$ соответственно. Коэффициент вариации более $0,3$ говорит о том, что из-за неравномерного распределения деформации по высоте прокатываемого металла возможно получение неоднородной зереной структуры по сечению проката в центральной зоне, по сравнению с приконтактной.

Современные программные комплексы МКЭ-моделирования позволяют оценить напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при толстолистовой прокатке, исключая гипотезу о плоских сечениях, применяемую в теории прокатки, и дать более достоверные сведения о характере проникновения деформации по всему сечению листа.

Список литературы

1. Э.А. Гарбер, И.А. Кожевникова. Теория прокатки. Учебник для студентов. – Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехник, 2013. – 305 с.
2. Грудев А.П. Теория прокатки. М.: Metallurgia, 1988. 240с.
3. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е.. Теория продольной прокатки. М.: Metallurgia, 1980. 340с.
4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Изд-во Уральского технического университета, 2001. 836 с.
5. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М.: Metallurgia, 1976. 488 с.