

УДК 621.771.01

Иванов А. В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ КРУПНЫХ ЗАГОТОВОК С ПОДСТУЖИВАНИЕМ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При прокатке относительно толстых полос, характеризующихся соотношением протяженности зоны пластической деформации $L_{пл}$ к средней толщине полосы $h_{ср}$ в диапазоне $L_{пл} / h_{ср} = 0,5...2,0$, в осевой зоне действуют значительные растягивающие напряжения [1–3]. При этом в вышеуказанной зоне наблюдаются макро неоднородности, связанные с особенностями кристаллизации непрерывно литой заготовки или слитка. Перечисленные факторы неблагоприятно влияют на качество готового металлопроката. Существуют различные способы интенсификации пластической деформации в осевых слоях прокатываемой полосы. К наиболее распространенным способам можно отнести: увеличение диаметров прокатных валков, увеличение единичных обжатий, увеличение суммарной деформации и т. д. Указанные способы требуют существенной модернизации оборудования и, следовательно, значительных капиталовложений. Существуют и технологические приемы [4, 5], повышающие качество производимого проката, например, подстуживание поверхностных слоев металла перед его деформированием, что приводит к снижению пластичности приконтактных слоев, при сохранении пластичности в осевой зоне прокатываемой полосы и, следовательно, к существенному изменению напряженно-деформированного состояния. Для определения эффективности описанного метода требуется качественная и количественная оценка напряженно-деформированного состояния прокатываемого металла при неоднородном температурном поле.

Целью исследования является определение влияния принудительного подстуживания поверхности слитка при горячей прокатке на напряженно-деформированное состояние и закрытие осевых дефектов с использованием программного продукта на основе метода конечных элементов – DeForm 3D.

Для моделирования процесса прокатки выбран слиток массой 4 300 кг из стали 45 (AISI-1045), применяемый на ПАО «Днепрспецсталь». Согласно паспорта слитка осевая пористость имеет протяженность $\approx 1\ 000$ мм и диаметр ≈ 60 мм. На рис. 1 представлена $\frac{1}{4}$ часть слитка с полостью вышеуказанных размеров. Прокатка слитков осуществлялась на заготовку для заготовочной клетки по схеме, представленной в табл. 1. Эскиз калибров представлен на рис. 2.

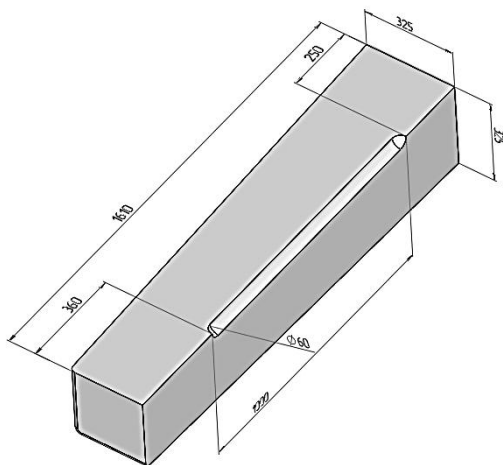


Рис. 1. $\frac{1}{4}$ часть слитка с полостью $\varnothing 60$ мм, развесом 4 300 кг

Таблица 1

Схема прокатки $\neq 260 \times 235$ мм из слитка массой 4 300 кг марки 45

| Калибр | Номер прохода | Обжатие Δh , мм | Уширение Δb , мм | Высота Н, мм | Ширина В, мм |
|----------|---------------|-------------------------|--------------------------|--------------|--------------|
| | | | | 650 | 650 |
| I | 1 | 75 | 5 | 575 | 655 |
| | 2 | 75 | 5 | 500 | 660 |
| | кантовка | | | | |
| | 3 | 85 | 10 | 575 | 510 |
| | 4 | 85 | 10 | 490 | 520 |
| | 5 | 85 | 10 | 405 | 530 |
| | 6 | 85 | 10 | 320 | 540 |
| кантовка | | | | | |
| II | 7 | 110 | 20 | 430 | 340 |
| | 8 | 110 | 20 | 320 | 360 |
| | кантовка | | | | |
| | 9 | 70 | 15 | 290 | 335 |
| | 10 | 70 | 15 | 220 | 350 |
| кантовка | | | | | |
| III | 11 | 90 | 15 | 260 | 235 |

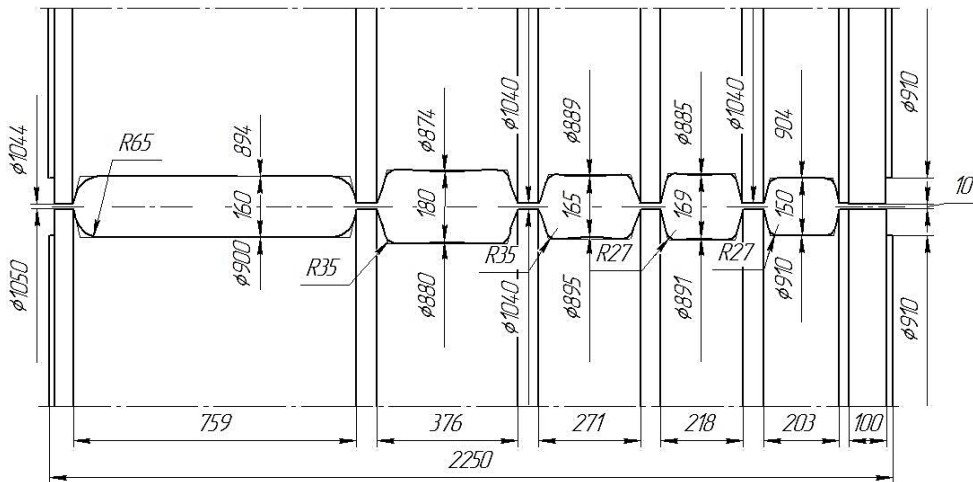


Рис. 2. Калибровка валков обжимной клетки

Для определения влияния принудительного подстуживания поверхностных слоев слитка на напряженно-деформированное состояние, рассмотрен процесс прокатки на обжимной клетке с различными паузами перед задачей металла в первый калибр. При этом условия процесса прокатки (условия трения, скорость вращения валков, диаметр валков и т. д.) и реологические свойства металла оставались неизменными. Для базового варианта выбрано время подстуживания равное 45 с, что соответствует среднему времени перемещения слитка с участка нагревательных колодцев к клетке стана. Для второго варианта дополнительное время подстуживания составило 600 с, таким образом, общее время – 645 с.

Для базового варианта температура поверхности слитка перед прокаткой составляет $\approx 1060^\circ\text{C}$, температура осевых слоев – $\approx 1150^\circ\text{C}$ (рис. 3, а). При дополнительном подстуживании температура поверхности слитка составляет $\approx 895^\circ\text{C}$, температура осевых слоев – $\approx 1150^\circ\text{C}$, при этом необходимо отметить наличие зоны толщиной $\approx 50\text{--}60$ мм с температурой $\approx 1090^\circ\text{C}$ (рис. 3, б).

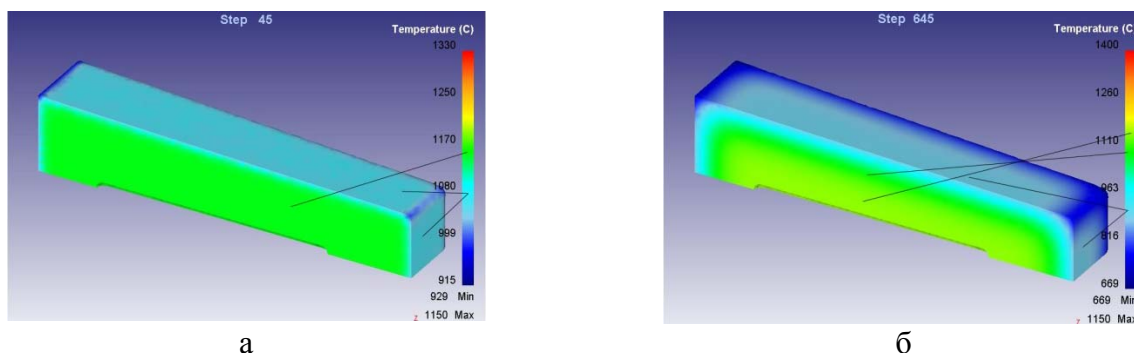


Рис. 3. Распределение температуры по сечению раската перед деформированием: а – базовый вариант; б – с дополнительным подстуживанием

После деформирования температурное поле изменилось следующим образом (рис. 4): в базовом варианте температура приконтактных слоев – $\approx 180^\circ\text{C}$, температура осевой зоны – $\approx 230^\circ\text{C}$, при дополнительном подстуживании температура подстуженных слоев – $\approx 130^\circ\text{C}$, температура осевой зоны – $\approx 220^\circ\text{C}$. Следует отметить, что толщина подстуженных слоев 65 мм, что почти в два раза больше толщины ($S = 35$ мм) приконтактных слоев в базовом варианте. Разница температур осевой зоны в рассматриваемых вариантах составляет всего 10°C , температура поверхностных слоев различается более существенно, на 50°C , температурный градиент по сечению раската в базовом варианте $\Delta t = 50^\circ\text{C}$, в альтернативном варианте почти в два раза больше $\Delta t = 90^\circ\text{C}$.

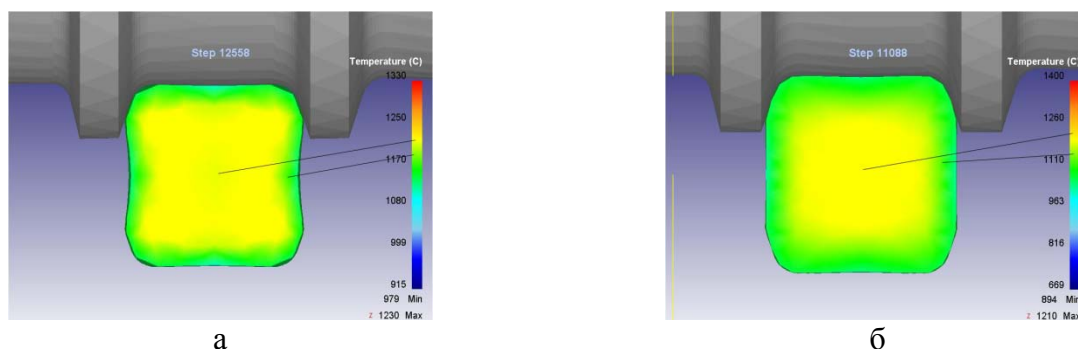


Рис. 4. Распределение температуры по сечению раската после деформации а – базовый вариант; б – с дополнительным подстуживанием

Полученные в результате моделирования данные показывают, что степень использования запаса пластичности, по критерию Кокрофта-Лэтэма, меньше на 28 % в осевой зоне и на 17 % – на поверхности (рис. 5) по сравнению с базовым вариантом. Распределение интенсивности деформаций сопоставимы для базового и исследуемого варианта прокатки (рис. 6). При этом в исследуемом варианте интенсивность деформации выше в зонах, примыкающих к граням слитка, которые охлаждаются более интенсивно по сравнению с плоскостью.

Размер отверстия, моделирующего осевую пористость слитка, в базовом варианте после одиннадцатого прохода составил – $5,34 \times 0,83$ мм, в исследуемом варианте отверстие заваривается уже после восьмого прохода.

Приведенные результаты сравнения свидетельствуют о снижении вероятности образований несплошностей в осевой зоне слитка, что, в свою очередь, доказывает эффективность принудительного подстуживания поверхностных слоев слитка (заготовки). При этом необходимо учесть, что подстуживание приводит к увеличению силы прокатки, так для базового варианта максимальное усилие прокатки составило 9,27 МН, а для исследуемого – 15,2 МН.

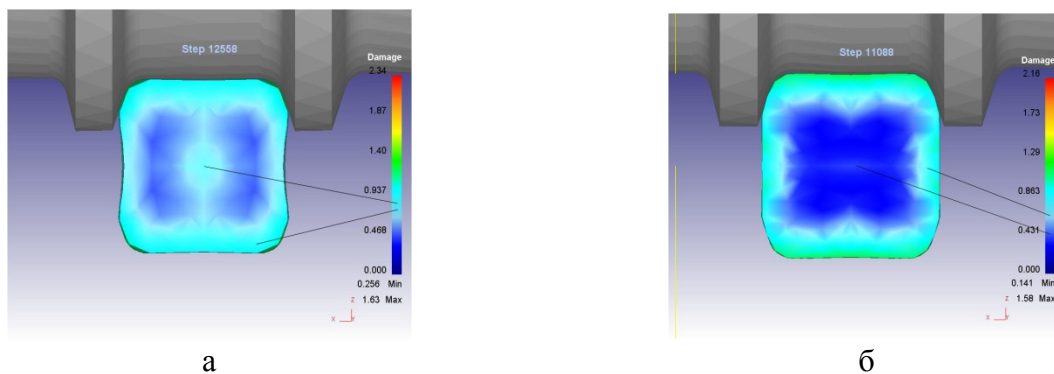


Рис. 5 Распределение степени использования запаса пластичности по сечению раската: а – базовый вариант; б – с дополнительным подстуживанием

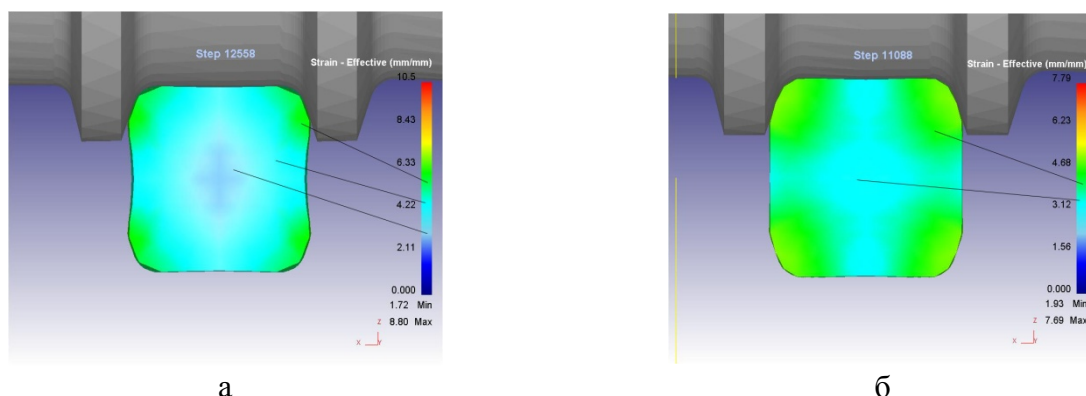


Рис. 6. Распределение интенсивности деформаций по сечению раската: а – базовый вариант; б – с дополнительным подстуживанием

ВЫВОДЫ

На основе метода конечных элементов (DeForm 3D) выполнено сравнительное моделирование напряженно-деформированного состояния слитка с различным временем подстуживания – 45 с и 645 с. В результате исследования установлено, что принудительное подстуживание поверхности слитка при горячей прокатке способствует снижению вероятности образования внутренних дефектов сплошности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке / М. Я. Бровман. – М. : Металлургия, 1991. – 265 с.
2. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос : монография / В. Ф. Потапкин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 316 с.
3. Прокатка толстых листов / П. И. Полухин, В. М. Клименко, В. П. Полухин [и др.]. – М. : Металлургия, 1984. – 288с.
4. Исследование величины торцевой утяжки слитка слитка при прокатке с неоднородным температурным полем / А. В. Иванов, В. В. Чигиринский, В. В. Широкобоков, О. А. Ярошенко // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 4 (25). – С. 148–152.
5. Пат. 54726 Україна, МПК В21В 9/00. Спосіб прокатки злитків / Іванов А. В., Чигиринський В. В., Обдул В. Д.; власник: Запорізький національний технічний університет. – и 2010 04576; заявл. 19.04.2010; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22. – 2 с.