

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.771: 669.13.017:620.18; 669.13.017:620.17

Полякова М.А., Извеков Ю.А.

## ОПИСАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МНОГОФАЗНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА

**Аннотация.** В настоящее время использование многофазных сталей для изделий автомобилестроения является одним из перспектив развития данной отрасли промышленности. Особенностью микроструктуры, определяющей свойства конечной металлопродукции из многофазных сталей, является ее формирование или изменение при внешнем термомеханическом воздействии. В статье рассматривается возможность использования основных положений теории совместной пластической деформации разных металлов применительно к процессам термомеханической обработки многофазных сталей. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является учет вида и количественного соотношения фаз, составляющих структуру стали. Для учета доли той или иной фазы в общем объеме материала предлагается использовать понятие «фазовый коэффициент заполнения». Разработанный подход базируется на том, что многофазные стали можно представить как многокомпонентную структуру, состоящую из мягких и твердых компонент, которыми являются формирующие фазы. При этом каждая фаза имеет свои характерные свойства, которые и определяют ее способность пластически деформироваться. Получены аналитические уравнения, которые позволяют учитывать и изменение количества фаз в процессе термомеханической обработки многофазной стали, и их свойства. Разработанный подход может быть использован для проектирования технологических процессов производства металлоизделий из многофазных сталей с использованием различных методов пластической деформации.

**Ключевые слова:** теория совместной пластической деформации разных металлов, многофазная сталь, микроструктура, фазовый состав, свойства, термомеханическая обработка

### Введение

Пластическая деформация используется не только как средство формирования формы изделия, но и как процесс управления внутренней структурой обрабатываемого металла. При правильно подобранных режимах обработки можно обеспечить выравнивание структуры, формирование благоприятной текстуры, измельчение зерна, что в конечном итоге обеспечивает необходимое сочетание прочностных и пластических свойств конечной металлопродукции [1]. Классическая теория пластической деформации основана на рассмотрении металла как однофазной однородной системы, несмотря на то, что структура стали состоит из различных фаз, например феррита и цементита [2]. Такой подход к представлению структуры стали в значительной степени упрощает описание происходящих в стали изменений при термомеханической обработке, а также широко используется в большинстве компьютерных программных продуктов, используемых для моделирования существующих процессов обработки давлением.

С начала 2000-х годов основной акцент исследований сместился в сторону обработки многофазных сталей, например DP TRIP-, Q&P-сталей и др., в которых в одной матрице присутствуют различные фазы с присущими им механическими свойствами (феррит, мартенсит, остаточный аустенит и др.) [3-5]. Такие стали можно рассматривать как естественные многокомпонентные системы, в которых внутри зерен и между фазами происходит взаимное перераспределе-

ние напряжений. Поэтому востребованные в настоящее время многофазные стали, структура которых, с одной стороны, определяется достаточно сложным химическим составом, а с другой – формируется в результате одновременного воздействия температуры и давления при обработке давлением, требуют разработки и использования принципиально новых теоретических подходов для описания и объяснения специфики их свойствообразования [6-8]. Например, в сталях типа TRIP часть аустенита превращается в мартенсит при деформации, а в сталях типа DP мягкая ферритная матрица деформируется совместно с более твердыми мартенситными включениями. Работы Bouaziz и соавт. [9], а также Sun и др. [10] показали, что при деформации многофазных сталей мартенситные включения могут «усилить» деформацию окружающей ферритной матрицы, а остаточный аустенит способен трансформироваться в мартенсит под действием напряжения, обеспечивая эффект TRIP. В таких материалах пластическая деформация протекает неравномерно, что требует более сложных теоретических расчетов и применения специальных подходов при проектировании технологических процессов их производства.

Современные модели включают учет фазовых превращений, текстур и микроструктурных механизмов упрочнения. В последние годы всё больше внимания уделяется физически обоснованным моделям, которые строятся на основе базовой структуры деформации: дислокационного упрочнения, взаимодействия фаз, трансформаций, рекристаллизации и т.д. Такие модели обеспечивают точность, особенно при описании сложных процессов термомеханической об-

работки. Однако они требуют большого объема входных данных, для проведения расчетов необходимо большое количество машинного времени.

Целью настоящего теоретического исследования является разработка подхода, позволяющего адекватно описывать процессы пластической обработки многофазных сталей при учете происходящих в них структурно-фазовых превращений.

### Методы исследования

Процессы пластической обработки разных металлов описываются теорией совместной пластической деформации, основоположником которой является Г.Э. Аркулис [11, 12]. Совместная пластическая деформация разных металлов (СПДРМ) представляет собой процесс, при котором два или более материала, обладающие различными механическими свойствами, деформируются одновременно в условиях общего напряжённого состояния. Эта теория является развитием классических положений механики сплошной среды и используется для описания поведения композитов, слоистых материалов, многослойных заготовок.

Теория СПДРМ базируется на следующих аспектах: все компоненты деформируются одновременно в условиях совместности; между компонентами существует прочная связь (например, отсутствие макроскопического скольжения между слоями); распределение напряжений и деформаций зависит от упруго-пластических свойств каждого компонента; внутренние напряжения возникают в результате различий в сопротивлении деформации.

В простейшем случае можно рассмотреть совместную деформацию двух металлов А и В, связанных между собой. Если один из компонентов (например, металл А) имеет более высокое сопротивление пластической деформации, то второй (металл В) будет деформироваться в большей степени. Это приведёт к возникновению внутренних напряжений, которые компенсируют разницу в механическом поведении при приложении внешней нагрузки. В результате формируется общее напряжённо-деформированное состояние, обеспечивающее совместную работу деформируемых металлов.

Для описания происходящих процессов в СПДРМ используются уравнения равновесия, совместности деформаций и условия текучести каждого компонента. Классический подход базируется на допущении равенства деформаций в контактной зоне (условие совместности), раздельном учёте законов упрочнения для каждого металла и общем законе сохранения энергии (или внешней работы деформации).

Определение возможности использования основных положений СПДРМ для описания процессов пластической деформации многофазных сталей обусловлена сложностью их фазового состава [13]. Так, многофазные стали, такие как DP (двухфазные), TRIP (с трансформационно-индуцированным упрочнением), CP (комплексно-легированные), содержат фазы с резко

различающимися прочностными и пластическими характеристиками. Во время пластической обработки эти фазы испытывают разные уровни напряжения и деформации, но деформируются совместно, подчиняясь граничным условиям непрерывности формы и напряжений. Например, при прокатке ферритно-мартенситной стали феррит начинает деформироваться при более низких напряжениях, в то время как мартенсит уже начинает подвергаться деформации. Это приводит к напряжённо-деформированному несоответствию на границах фаз, что может вызвать локализацию пластической деформации, межфазовое растрескивание и, как результат, появление трещин в прокатываемом металле.

С этой точки зрения главной задачей обработки давлением многофазных сталей является обеспечение деформационных условий, при которых происходит пластическая совместимость фаз. Под этим понимается способность разных слоёв (или участков) материала деформироваться согласованно, без разрывов, трещин или расслоений. Кроме того, необходимо учитывать изменение фазового состава таких сталей в процессе пластической деформации, которое количественно можно оценить в виде соотношения фаз, обладающих различными свойствами.

### Результаты и их обсуждение

Для подтверждения возможности применения теории СПДРМ для процессов пластической обработки многофазных сталей рассмотрим, каким образом изменяется фазовый состав при различных режимах деформационной обработки. На рис. 1 представлена микроструктура TRIP-стали (C 0,3-0,5%, Mn 2,5-4,0%, до 4,0% Si %, Al до 1%), полученной металлургическим способом.

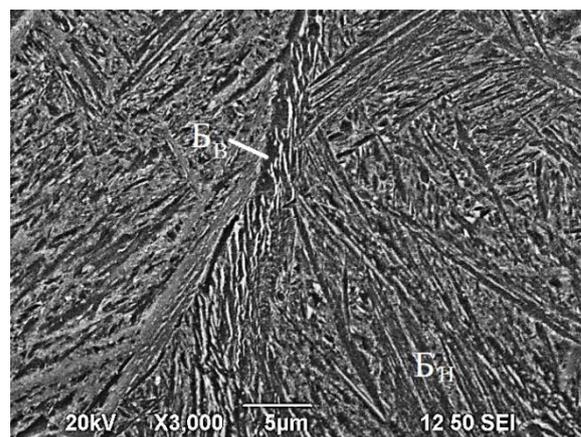


Рис. 1. Микроструктура образца TRIP-стали в недеформированном состоянии, полученной традиционной технологией металлургического производства

Микроструктура представляет собой смесь бейнита верхнего и бейнита нижнего. Иглы расположены преимущественно под углом 120° друг к другу.

После термической обработки (закалка + последующая изотермическая выдержка) происходит преобразование бейнита в мартенсит с объемной долей остаточного аустенита около 10% (рис. 2).

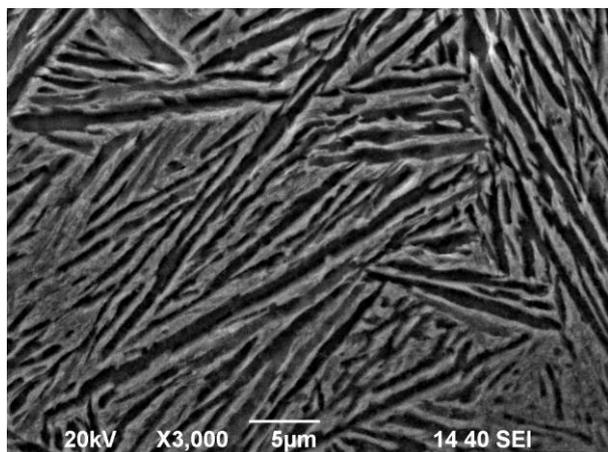


Рис. 2. Микроструктура образца TRIP-стали после закалки от температуры 760°C и последующей изотермической выдержки при температуре 400°C в течение 20 мин

В результате пластической деформации происходит изменение количественного соотношения фаз в зависимости от прикладываемой нагрузки (рис. 3).

Микроструктура представляет мартенсит, однако объемная доля остаточного аустенита уменьшается с 6,44 % (см. рис. 3, а) до 5,3% (см. рис. 3, б).

Вполне очевидно, что происходящие изменения микроструктуры будут оказывать влияние на деформационное поведение данной многофазной стали при пластической деформации.

Рассмотрим деформацию многофазной стали, микроструктура которой состоит из мягкой (М) и твердой (Т) фаз [14]. Предположим, что внешняя нагрузка распределяется между фазами пропорцио-

нально их несущей способности. Назовем долю той или иной фазы по отношению к общему объему материала фазовым коэффициентом заполнения, который обозначим через  $A$ . Тогда после деформации многофазного тела удельный объем  $i$ -й фазы металла  $A_i$  можно рассчитать по формуле

$$A_i = \frac{V_{0i} - \varepsilon_i V_{0i}}{V_0 - \varepsilon V_0}, \quad (1)$$

где  $V_0$  и  $V_{0i}$  – изменение объема фазы до и после  $i$ -го воздействия пластической деформацией;  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_i$  – суммарная степень деформации и степень деформации в ходе  $i$ -го воздействия пластической деформацией.

Разделив знаменатель и числитель на  $V_0$ , получаем

$$A_i = A_{0i} \left( \frac{1 - \varepsilon_i}{1 - \varepsilon} \right), \quad (2)$$

где  $A_{0i}$  – количество фазы до начала деформации.

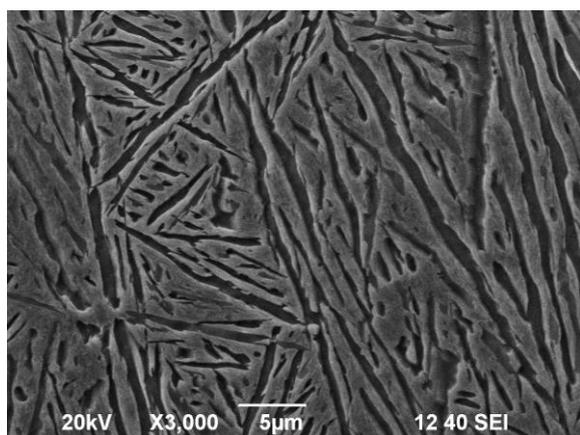
Из первого условия статики следует соотношение

$$\sigma_1 F_1 + \sigma_2 F_2 + \dots + \sigma_m F_m = \sigma_z F, \quad (3)$$

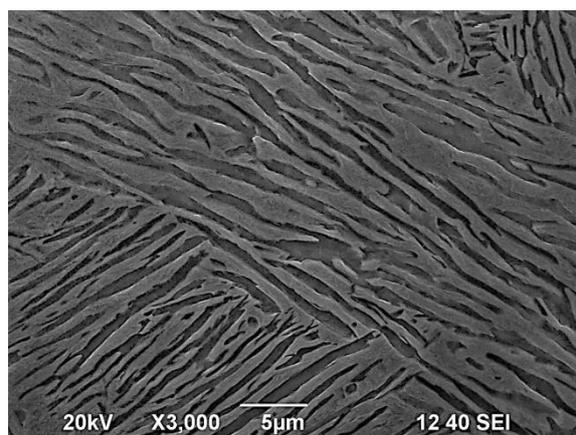
где  $\sigma_z$  – среднее продольное внешнее напряжение, МПа;  $\sigma_i$  – фазовые продольные напряжения каждой из фаз, МПа;  $F$ ,  $F_i$  – площадь поперечного сечения деформируемой полосы и  $i$ -й фазы стали.

Учитывая, что при больших пластических деформациях и линейном напряженном состоянии значения  $\sigma_i$  равны текущему пределу текучести  $\sigma_{si}$  каждой фазы, получаем

$$\sigma_z = \sigma_s = A_1 \sigma_{s1} + A_2 \sigma_{s2} + \dots + A_i \sigma_{si}, \quad (4)$$



а



б

Рис. 3. Микроструктура образца TRIP-стали после термической обработки и последующей деформационной обработки с прикладываемым усилием 25 кН (а) и 53 кН (б)

Поскольку внешняя нагрузка распределяется между фазами пропорционально их несущей способности, то произведение  $A_i\sigma_i$  можно представить как приведенный предел текучести, аналогично физическому пределу текучести фазы для однофазной стали [40]. Из этого следует, что для многофазной стали текучий предел текучести можно записать в следующем виде:

$$\sigma_i = \eta_i D_i, \quad (5)$$

где  $\eta_i$ ,  $D_i$  – продольная деформация и модуль пластичности  $i$ -й фазы.

Используя условие совместной деформации, связь между внешними деформирующими напряжениями  $\sigma_z$  и деформацией  $\eta$  многофазного тела выражается так:

$$\sigma_z = \eta(A_1 D_1 + A_2 D_2 + \dots + A_m D_m) = \eta D, \quad (6)$$

где  $D$  – модуль пластичности многофазной стали, равный сумме приведенных модулей пластичности ее фаз  $A_i D_i$ .

Условие совместной пластической деформации многофазной стали с учетом ее фазового состава можно сформулировать следующим образом:

$$\sigma_{z1} - \sigma_{x1} = \sigma_{s1}; \sigma_{z2} - \sigma_{x2} = \sigma_{s2}; \dots; \sigma_{zm} - \sigma_{xm} = \sigma_{sm}, \quad (7)$$

где  $m$  – количество фаз в стали.

В результате преобразований получим формулу, которая описывает взаимосвязь деформирующего напряжения с изменением количественного соотношения фаз в процессе пластической деформации:

$$\sigma_z = \sum_1^m A_i \sigma_{0i} + \eta \sum_1^m A_i \theta_i = \sigma_{0z} + \eta \theta_0, \quad (8)$$

где  $\sigma_{0i}$  – начальный предел текучести  $i$ -й фазы;  $\theta_i$  – модуль упрочнения  $i$ -й фазы;  $\sigma_{0z}$  – деформирующее напряжение в начальный момент равномерной деформации, равно сумме приведенных начальных пределов текучести фаз;  $\theta_0$  – общий модуль упрочнения многофазной стали.

### Выводы

Традиционное теоретическое описание процессов пластической деформации базируется на представлении обрабатываемого металла как гомогенной среды. Использование теории совместной пластической деформации разных металлов позволяет адекватно описать процессы пластической деформации многофазных сталей. В данном случае каждая фаза рассматривается как отдельная структурная составляющая с присущими ей физическими свойствами.

Адаптируя основные положения теории СПДРМ для процессов термомеханической обработки многофазных сталей, появляется возможность учитывать происходящие в таких сталях фазовые превращения, результатом которых является изменение количественного соотношения фаз. Это, в свою очередь, позволяет определять уровень получаемых свойств готовой металлопродукции. Особую важность приобретают вопросы прогнозирования свойства образования многофазных сталей на этапе проектирования технологических процессов производства металлопродукции, основанных на различных видах пластической деформации, а также при отсутствии достаточного объема статистической информации.

### Список источников

1. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1970. 492 с.
3. Малышевский В.А., Турчанинов И.А. Современные многофазные стали. Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 234 с.
4. Тихонов А.С., Амосов А.П. Многофазные стали нового поколения для автомобилестроения. Самара: СамГТУ, 2016. 178 с.
5. Alvarez-Armas I. Duplex stainless steels: brief history and some recent alloys // Recent Patents on Mechanical Engineering. 2008, vol. 1, pp. 51-57.
6. Grassel O., Kruger L., Frommeyer G., Meyer L.W. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development - properties - application // International Journal of Plasticity. 2000, vol. 16, pp. 1391-1409.
7. Cabrera J.M., Mateo A., Llanes L., Prado J.M., Anglada M. Hot deformation of duplex stainless steels // Journal of Materials Processing Technologies. 2003, vol. 143-144, pp. 321-325.
8. Структура стали с метастабильным аустенитом после термомеханической обработки по различным режимам / Шляхова Г.В., Орлова Д.В., Данилов В.И., Данилова Л.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2021. Т. 64. № 6 (763). С. 106-110.
9. Bouaziz O., Allain S., Scott C. et al. High strength and ductility of dual-phase steels: an overview // Materials Science and Engineering: A. 2011, vol. 528, pp. 2738-2744.
10. Sun X., Choi K.S., Liu W.N., Khaleel M.A. Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization // International Journal of Plasticity. 2009, vol. 25, pp. 1888-1909.
11. Аркулис Г.Э. Совместная пластическая деформация разных металлов. М.: Металлургия, 1964. 268 с.
12. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 351 с.

13. Особенности построения модели деформации многофазных сталей с учетом изменения фазового состава в процессе прокатки / Трубников Н.А., Лопатина Е.В., Полякова М.А., Голубчик Э.М. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2025. Т.1. С. 136.
14. Развитие положений теории совместной пластической деформации разных металлов при прокатке полосовой стали / Полякова М.А., Голубчик Э.М., Лопатина Е.В., Трубников Н.А. // Черные металлы. 2024. № 6 (1110). 06.2024. С. 8-13.

### Сведения об авторах

**Полякова Марина Андреевна** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обработки материалов давлением им. М.И. Бояршинова, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

**Извеков Юрий Анатольевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: pmi@magtu.ru

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### DESCRIPTION OF PLASTIC DEFORMATION OF MULTIPHASE STEELS DURING THERMODEFORMATION TREATMENT TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGE IN PHASE COMPOSITION

**Polyakova Marina A.** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Materials Forming named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: m.polyakova@magtu.ru

**Izvekov Yurii A.** – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Informatics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pmi@magtu.ru

**Abstract.** Currently, application of multiphase steels for automotive products is one of the prospects for the development of this area of industry. The peculiarity of the microstructure that determines the properties of the final metal products from multiphase steels is its formation or change under affect of external thermal deformation. The article describes the possibility of using the basic principles of the theory of Joint plastic deformation of dissimilar bodies in relation to the processes of thermal and deformation treatment of multiphase steels. A distinctive feature of the proposed approach is the consideration of the type and quantitative ratio of phases that steel structure consists of. To take into account the share of a particular phase in the total volume of material, it is proposed to use the concept of “phase filling factor”. The developed approach is based on the fact that multiphase steels can be represented as a multicomponent structure consisting of soft and hard components, which are the forming phases. Moreover, every phase has its own characteristic properties, which determine its ability to undergo plastic deformation. Analytical equations have been obtained which make it possible to take into consideration both the change in the number of phases during the process of thermal and deformation treatment of multiphase steel and their properties. The developed approach can be used to design technological processes for the manufacturing the metal products from multiphase steels using various methods of plastic deformation.

**Keywords:** theory of Joint plastic deformation of dissimilar bodies, multiphase steel, microstructure, phase composition, properties, thermal and deformation treatment

---

Ссылка на статью:

Полякова М.А., Извеков Ю.А. Описание пластической деформации многофазных сталей в процессе термомодеформационной обработки с учетом изменения фазового состава // Теория и технология металлургического производства. 2025. №3(54). С. 21-25.  
Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Description of plastic deformation of multiphase steels during thermodeformation treatment taking into account the change in phase composition. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025, vol. 54, no. 3, pp. 21-25.