

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Физическая мезомеханика.
Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина

**в рамках
Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ: МИКРОСТРУКТУРА, МОДЕЛЬ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Решетняк А.А., Сурикова Н.С.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

Поперечно-винтовая прокатка (ПВП) металлических поликристаллических (ПК) материалов является одним из перспективных методов интенсивной пластической деформации (ИПД) при получении длинномерных заготовок с СМК структурой, характеризующихся повышенной прочностью и достаточной большой пластичностью [1-3]. Зачастую она применяется совместно с другими методами ИПД – продольной прокаткой на гладких валках, РКУП и др. Однако микромеханизмы пластической деформации при ПВП зависят от многих факторов и требуют тщательного изучения и теоретического описания.

В работе исследуются деформационная структура прокатки метастабильной аустенитной нержавеющей стали 12Х15Г9НД (АISI 201) (иницированные в [4-6]), оптимально легированной Cr, Ni, Mn, Cu и N с составом в изначальной поставке: Fe – 0,12 вес. % – (14,0-16,5) вес. % Cr – (8,5-10,5) вес. % Mn – (1,0-1,5) вес. % Ni – 2,0 вес. % Cu – 0,060 вес. % P – 0,030 вес. % S – 0,2 вес. % N. Проводятся механические квазистатические испытания образцов стали со скоростью $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$ одноосным растяжением на универсальной испытательной машине “Instron 5582” до и после процесса ПВП, при которых сталь 12Х15Г9НД имела различный структурный состав, включая модальность размеров зерен, спектр разориентировок зеренных границ γ -фазы и характеристик дисперсионных частиц. Сравняются экспериментальные и теоретические значения прочностных характеристик, деформационные кривые стали 12Х15Г9НД.

Теоретическое описание микромеханизмов пластической деформации при ПВП предполагает наличие адекватной модели, учитывающей преобразование и обмен энергиями при перестройках дефектной структуры стали 12Х15Г9НД в процессе деформации. Подходящим кандидатом является статистическая теория напряжения течения ПК материалов [7] в квазиравновесных состояниях, позволяющая в рамках дисклинационно-дислокационного механизма деформирования аналитически определить интегральные прочностные и пластичные характеристики, в частности пределы текучести, σ_y , и прочности, σ_s , коэффициент деформационного упрочнения и в целом при ряде приближений установления закона $\sigma = \sigma(\epsilon)$, на основе параметров микроструктуры: многофазности, числа мод I зерен каждой из фаз и их средними размерами d_i , разориентировками их границ, дисперсионным упрочнением, (нано)пористостью. Для вычисления механических характеристик, в естественном предположении, что дефектная структура зерен, включающая дефекты упаковки и двойники в качестве 2D-мерных структур и различные ансамбли дислокаций в качестве 1D-мерных – может быть представлены в виде только комбинаций дислокаций из разных систем скольжения, использовано предположение¹ (в [7] для однофазного ПК материала), что каждое зерно любой из фаз имеет дискретный спектр распределения энергии по квазистационарным энергетическим уровням при пластическом нагружении с наибольшим уровнем, равным энергии максимальной прямолинейной дислокации. Энергетический спектр зерна (кристаллита) любой из фаз Δ , ($\Delta = \alpha, \beta, \gamma, \dots$) выбран в простом приближении - эквидистантно отстоящих энергетических зон (при реализации наиболее вероятного ансамбля дислокаций с одним вектором Бюргерса, b_Δ), начиная от нулевой энергии кристаллита без дефектов, E_0 , до уровня с максимальным

¹ в [7] рассмотрена модель однофазного одномодального ПК материала, развитая до модели двухфазной ПК материала [8,9], со второй фазой, описываемой поровой частью около каждого зерна, далее развитая на случай ПК агрегатов как с дисперсионным упрочнением частицами [10], так и с многомодальностью зерен по размерам [11].

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многофазной иерархически организованной структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

значением атомов (элементарных частей для частичных дислокаций) на оси дислокации, E_N^{Δ} , $N_{\Delta} = d_{\Delta}/b_{\Delta}$. Механизм деформирования основан на порождении зон локализованной деформации, в которых, при нагружении термо-флуктуационно, нарушена локальная трансляционная инвариантность кристаллической решетки (КР) в данной фазе. Порция энергии, необходимая для перехода из одного состояния зерна компоненты ПК материала фазы Δ с модулем сдвига G_{Δ} и вектором Бюргера длины b_{Δ} в ближайшее соседнее, равна энергии единичной дислокации, $\frac{1}{2}G_{\Delta}b_{\Delta}^3$, соизмеримой с энергией активации атома в компоненте материала с фазовым состоянием Δ при диффузии.

Неравновесный процесс квазистатического деформирования представлен в виде последовательности равновесных процессов, с учетом малости времени релаксации [7] атомов КР зерна в новые устойчивые состояния в сравнении со значением минимального времени между актами пластической деформации в нем. На участках равновесности при накопленной деформации, ε - вероятности появления любого из возможных дефектов в каждой компоненте Δ при элементарном акте ПД в момент времени, $t = \varepsilon/\dot{\varepsilon}$, (отсчитываемого от начала собственно неупругой деформации) распределены в соответствии с распределением Больцмана, $P_{\Delta n}(\varepsilon) \sim A_{\Delta}(\varepsilon) \exp\left\{-\frac{n}{2}G_{\Delta}b_{\Delta}^3\varepsilon/N_{\Delta}kT\right\}$, с эффективным значением вектора Бюргера $b_{\Delta\varepsilon} = b_{\Delta}(1 + \varepsilon)$.

Распределение скалярной плотности дислокаций (СПД) в каждой компоненте фазы Δ в квазиравновесном состоянии с масштабным фактором $M_{\Delta}(\varepsilon)$ и усредненным фактором роториентировки зерен \bar{K}_{Δ} , параметром полиэдральности $m_{\Delta 0}$ [7,12],

$$\bar{\rho}_{\Delta}(b_{\Delta\varepsilon}, d_{\Delta}, T, \varepsilon) = M_{\Delta}(0)\bar{K}_{\Delta} \frac{m_{\Delta 0}}{(d_{\Delta})^2} \varepsilon \left(e^{M_{\Delta}(\varepsilon)b_{\Delta}/d_{\Delta}} - 1\right)^{-1} + o(\varepsilon^2), \quad M_{\Delta}(\varepsilon) = G_{\Delta}b_{\Delta}^3/2kT, \quad (1)$$

во-первых, приводит к напряжению течения (НТ) $\sigma_{\Delta}(\varepsilon)$ компоненты Δ согласно механизму деформационного упрочнения Тейлора, содержащему нормальный [5] и аномальный соотношения Холла-Петча (при $\varepsilon=0.002$) соответственно для крупно- и нанокристаллических зерен с характерным максимумом². Во-вторых, Т-поведение $\sigma_{\Delta}(\varepsilon)$,

$$\sigma_{\Delta}(\varepsilon, d_{\Delta}) = \sigma_{\Delta}(\varepsilon) = \sigma_{\Delta 0}(\varepsilon) + \alpha_{\Delta} m \frac{G_{\Delta} b_{\Delta}}{d_{\Delta}} \sqrt{\frac{6\sqrt{2}}{\pi} m_{\Delta 0} \varepsilon M_{\Delta}(0)} \left(e^{M_{\Delta}(\varepsilon)b_{\Delta}/d_{\Delta}} - 1\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

и в частности, $\sigma_{\Delta} = \sigma_{\Delta}(0.002, d_{\Delta})$, выявило *размерно-температурный эффект* (РТЭ), заключающийся для плотноупакованных зерен одномодального ПК агрегата в увеличении предела текучести σ_y с ростом T при всех зернах с $d < 3d_0$ и обычном уменьшении σ_y при $d > 3d_0$ [8-11]).

Для многофазного квазиравновесного ПК агрегата с легирующими частицами других химических элементов представление для интегрального НТ $\sigma_{\Sigma}(\varepsilon)$ интерполируется в аддитивном приближении с неотрицательным весом F_{Δ} НТ для двухфазной одномодальной компоненты Δ с дисперсионным упрочнением $\sigma_{\Delta \text{dis}}(\varepsilon_{\Delta}, d_{\Delta})$ [8-11]:

$$\sigma_{\Sigma}(\varepsilon) = \sum_{\Delta} F_{\Delta} \sigma_{\Delta \text{dis}}(\varepsilon_{\Delta}, d_{\Delta}), \quad \sum_{\Delta} F_{\Delta} = 1, \\ \sigma_{\Delta \text{dis}}(\varepsilon_{\Delta}, d_{\Delta}) = (1 - U_{\Delta}^{\text{dis}}) \{f_{\Delta}^1 \sigma_{\Delta C}(\varepsilon_{\Delta}^C) + f_{\Delta}^2 \sigma_{\Delta C2}(\varepsilon_{\Delta}^{C2}) - f_{\Delta}^3 \sigma_{\Delta P}(\varepsilon_{\Delta}^P)\} + U_{\Delta}^{\text{dis}} \sigma_{\Delta \text{dis}}(\varepsilon_{\Delta}^{\text{dis}}, d_{\Delta}^{\text{dis}}) \quad (3) \\ \varepsilon_{\Delta} = (1 - U_{\Delta}^{\text{dis}}) (f_{\Delta}^1 \varepsilon_{\Delta}^C + f_{\Delta}^2 \varepsilon_{\Delta}^{C2} + f_{\Delta}^3 \varepsilon_{\Delta}^P) + U_{\Delta}^{\text{dis}} \varepsilon_{\Delta}^{\text{dis}}, \quad 0 \leq U_{\Delta}^{\text{dis}} < 1, \quad \sum_{i=1}^3 f_{\Delta}^i = 1.$$

В (3) $\sigma_{\Delta C}$, $\sigma_{\Delta C2}$, $\sigma_{\Delta P}$ являются НТ кристаллитной части (твердая фаза), зернограничной (мягкой фазы) и поровой (реализующейся в основном в СМК и НК областях) частей, задающихся согласно соотношению (2). В случае многомодальности по размерам зерен d_{Δ} , любой из фаз их НТ $\sigma_{\Delta \text{dis}}(\varepsilon_{\Delta}, d_{\Delta})$ представляется в виде суммы $\sigma_{\Delta C}^1$, $\sigma_{\Delta C2}^1$, $\sigma_{\Delta P}^1$ с соответствующим весом f_{Δ}^1 , f_{Δ}^2 , f_{Δ}^3 .

Представление для напряжения течения (3) является основой вычисления прочностных характеристик применительно к метастабильной аустенитной нержавеющей стали 12X15Г9НД, получения деформационных кривых с учетом выполнения критерия разрушения Бекофена-Консидера: $\sigma_{\Sigma} = d\sigma_{\Sigma}/d\varepsilon$. Их сравнение с экспериментальными

² Максимум СПД и напряжение течения для одномодального и однофазного ПК агрегата достигается в зернах размера $d_0(\varepsilon, T) = b \frac{G^3(1+\varepsilon)^3}{2 \cdot 1,59363 \cdot kT}$ порядка 10^{-8} - 10^{-7} м, совпадая для конкретных материалов с экспериментом.

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многофазной иерархически организованной структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

интегральными характеристиками демонстрируют корректность предложенной модели, верно учитывающей структурно-фазовый состав испытуемых образцов.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН на 2013-2020 гг. Проекты III.23.1.1, III.23.2.4 и Гранта РФФИ № 18-08-00221.

1. Потапов И.Н. Технология винтовой прокатки./ И.Н. Потапов, П.И. Полухин.– М.: Металлургия, 1990.– 344с.
2. Иванов М.Б., Пенкин А.В., Колобов Ю.Р. и др. Теплая поперечно-винтовая прокатка в валах конической формы как метод интенсивной пластической деформации.//Деформация и разрушение материалов, 2010.–№9.– С. 13.
3. Иванов К.В., Найденкин Е.В., Лыкова О.Н., Раточка И.В. и др. Эволюция структуры и механических свойств сплава ВТ6 при поперечно-сдвиговой прокатке и последующих деформационных и термических обработках// Известия вузов. Физика.– 2017.–Т. 60.–№7.– С. 126.
4. N. S. Surikova, V. E. Panin, N. A. Narkevich, I. P. Mishin, A. I. Gordienko. Formation of a multilevel hierarchical mesostructure by cross rolling and its influence on the mechanical behavior of austenitic steel //Physical Mesomechanics. 2018. V.21. №5. P. 430 – 440.
5. Surikova N.S., Vlasov I.V, Narkevich N.A., Gordienko A.I., Kuznetsov P.V. Structure and deformation properties of austenitic stainless steel //Physics of Metals and Metallography. 2020. Vol. 121. No.3. P. 276–283.
6. N. Surikova, V. Panin, N. Narkevich, A. Gordienko, N. Surikov «Hardening of austenitic stainless steel by intensive cross and screw rolling». //AIP Conference Proceedings **2051**, 020296 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5083539>
7. Reshetnyak A.A., Statistical approach to flow stress and generalized Hall-Petch law for polycrystalline materials under plastic deformations // e-print - arXiv:1803.08247[cond-mat.mtr-sci].
8. Reshetnyak A.A., Peculiarities of temperature dependence for generalized Hall-Petch law and two-phase model for deformable polycrystalline materials // e-print - arXiv: 1805.08623[cond-mat.mtr-sci].
9. Reshetnyak A.A., Sharkeev Yu.P., Two-phase model of the polycrystalline aggregate with account for grain-boundary states under quasi-static deformation // AIP Conference Proc.. –2018. V.2051-p.020251 – e-print - arXiv:1809.03628[cond-mat.mes-hall].
10. Cevizovic D., Reshetnyak A.A., Sharkeev Yu.P., Towards a theory of flow stress in multimodal polycrystalline aggregates. Effects of dispersion hardening. // AIP Conference Proc. –2019.- V. 2167.- № 020047.- P.020047 – e-print - arXiv: 1908.09338[cond-mat. mtrl-sci].
11. Reshetnyak A.A., On statistical quantized approach to flow stress and generalized Hall-Petch law for deformable polycrystalline materials. Temperature-dimension effect. – e-print - arXiv: 1912.07437 [cond-mat.mes-hall].
12. Shilko E.V., Reshetnyak A.A., Sharkeev Yu.P., On combined quantized and mechanical description for the Chernov-Lüders macroband of localized deformation, // AIP Conference Proc. –2019.- V. 2167.- № 020292.- P.020292, arXiv:1909.02754 [cond-mat.mes-hall].