DOI: 10.15593/2224-9877/2017.2.01
УДК 669.141.232: 669.182.36:669.018.472

А.И. Плохих, А.Г. Колесников, М.Д. Сафонов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПСЕВДОИНВАРНЫЙ ЭФФЕКТ В МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ СТАЛЕЙ

В работе представлены результаты исследования анизотропии термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР), который был обнаружен в многослойном металлическом материале, изготовленном методом горячей пакетной прокатки на основе сталей 08кп и 08Х18Н10. Установлено, что материал, состоящий из чередующихся между собой слоев указанных сталей, имеет аномально низкие значения ТКЛР в перпендикулярном к плоскости проката направлении (ND) и одновременно с этим нормальные значения ТКЛР в плоскости этого же листового материала в направлениях RD и TD. Для объяснения этого явления была предложена гипотеза о взаимосвязи нормальных и касательных напряжений, возникающих на межслойных границах такого материала, вследствие существенной разницы значений ТКЛР сталей, используемых для создания многослойного материала. Подтверждением гипотезы является значительное влияние, которое оказывают напряжения сжатия, возникающие в перпендикулярном плоскости проката направлении ND, со стороны стали с более высокими значениями ТКЛР (сталь 08Х18Н10) на ту составляющую многослойного материала (сталь 08кп), которая претерпевает $\alpha\rightarrow\gamma$-переход в процессе нагрева. Показано, что величина $\alpha\rightarrow\gamma$-перехода, зафиксированная в процессе нагрева образца стали 08кп, многократно возрастает в том случае, когда сталь находится в составе многослойной композиции. При этом такое же сильное действие, но уже растягивающего свойства напряжения оказывают на слои стали 08кп в направлениях RD и TD. Это вызывает практически полную компенсацию сжатия в многослойном материале, обусловленную $\alpha\rightarrow\gamma$-превращением, что хорошо заметно на дилатометрических кривых в указанных направлениях.

Ключевые слова: сталь, композитная заготовка, горячая пакетная прокатка, многослойный металлический материал, направление прокатки, дилатометрический анализ, термический коэффициент линейного расширения, полиморфное превращение, диффузия, микроструктура.

A.I. Plokhikh, A.G. Kolesnikov, M.D. Safonov

Bauman Moscow State Technical University
(National Research University of Technology), Moscow, Russian Federation

HIGH TEMPERATURE PSEUDO-INVAR EFFECT IN MULTILAYER STEEL MATERIALS

The paper presents the results of research into Coefficients of Thermal Expansion (CTE) anisotropy discovered in multilayer metal material produced by hot pack rolling based on 1008 and AISI 304 steels. It has been established that the material comprised of interleaving layers of the two steel types features abnormally low CTE in the direction normal to the rolling plane (ND) with regular TEC values in the plane of the plate material along RD and TD directions. A hypothesis has been proposed to ex-

plainthe phenomenon by an interrelation between normal and tangent stresses generated in the interlayer boundaries within the material resulting from substantial difference in the CTEs of the steel types comprising the multilayer material. The hypothesis is confirmed by the substantial effect of compression stresses, normal to the rolling plane ND, generated from the higher CTE steel (AISI 304) on the other component of the multilayer material (1008) that experiences α→γ transformation during heating. It is shown that the value α→γ transformation recorded during 1008 steel heating increases manifold when the steel is a part of the multilayer composition. At the same time 1008 layers experience equally strong, yet tensile stress in directions RD and TD. This results in virtually complete compression compensation in the multilayer material induced by α→γ transformation, which is well marked on the dilatometric curves along the specified directions.

Keywords: steel, composite billet, hot pack rolling, multilayer metal material, rolling direction, dilatometric analysis, coefficients of thermal expansion, polymorphic transformation, diffusion, microstructure.

Введение

Анализ результатов многочисленных исследований показывает, что инвароподобные характеристики проявляются у различных веществ, отличающихся, например, по типу строения: кристаллическое или аморфное, по типу магнитного упорядочения, имеющих гомогенный или негомогенный типы твердого раствора, т.е. инварный эффект является многогранным, часто встречающимся в природе явлением [1]. Яркий пример этого – хорошо изученное соединение ZrW_2O_8, имеющее отрицательный термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) изотропного характера во всем температурном интервале своего существования [2].

Общим относительно проявления инварного эффекта в Fe–Ni-сплавах является понимание его ферромагнитной природы и связи с магнитообъемным эффектом, при котором отрицательное тепловое расширение индуцируется магнитным переходом парамагнитной в ферромагнитную или антиферромагнитную фазу. ТКЛР же сплава в определенном температурном интервале является результатом конкурентного действия между нормальным и отрицательным термическим расширением. Между тем, по мнению некоторых авторов, коварное (инварное) поведение – не более чем результат определенного «удачного» соотношения термодинамических параметров в ферромагнетиках [3]. Пластическая деформация, применяемая для повышения прочностных свойств, не оказывает существенного влияния на инварные характеристики, в том числе при использовании интенсивной пластической деформации [4], а в некоторых случаях их ухудшает [5].

В то же время применение пластической деформации для формирования в материалах выраженной анизотропии позволило обнаружить инварные аномалии в текстурованных сплавах на основе титана и меди при условии протекания в них мартенситного превращения [6, 7]. Результаты последних исследований в этом направлении демонстрируют заманчивую перспективу получения широкого спектра конструкционных материалов, обладающих отрицательными значениями ТКЛР, на основе материалов, претерпевающих мартенситное превращение (рис. 1).

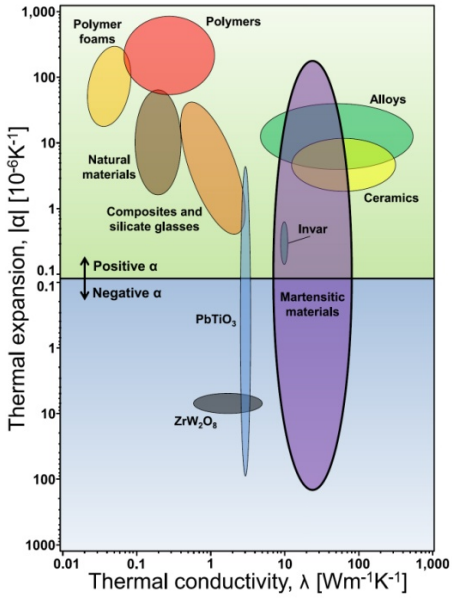

Рис. 1. Сравнительная диаграмма теплового расширения и теплопроводности для материалов с положительными и отрицательными значениями ТКЛР [8]

Известно, что аномальные деформационные или тепловые характеристики, которые традиционно наблюдаются в композиционных материалах, являются результатом взаимодействия локальных микроскопических полей упругих напряжений, что практически не встречается в материалах с однородной структурой. Созданием теоретических основ получения таких композиционных материалов занимались многие исследователи, что привело к обнаружению ряда интересных эффектов в композитах и создало стимул для активизации работ по созданию материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона, а также поиску материалов с аналогичными характеристиками ТКЛР [9–13].

Так, в частности, известна математическая модель, в соответствии с которой ТКЛР может иметь отрицательные значения в материалах со слоистым строением на основе бинарных (иридий + инвар) либо тройных (иридий + вольфрам + инвар) композиций металлов. Основным критерием при выборе материалов для композиций является существенная разница в модуле нормальной упругости E и значении ТКЛР, которая для выбранных материалов может отличаться в 4–5 раз [12, 13].

Однако технологические аспекты, связанные с совместимостью подобных материалов, межслойной диффузией легирующих элементов, способами создания неразрывной связи между слоями, благодаря которым и стало бы возможным проявление указанного эффекта, рассмотрены не были. Исходя из этого актуальна идея реализации разработанных подходов в конструкционных металлических материалах, которые имеют особое слоистое строение, но которые были бы получены на основе доступных и технологичных материалов, например на основе сталей.

Материалы и методы исследования

Исходя из представленных соображений в качестве модельной была выбрана композиция, состоящая из сталей 08кп и 08Х18Н10. Можно видеть, что различие в значениях ТКЛР и модуля нормальной упругости не столь значительное, как у материалов разработанной математической модели, и в интервале исследуемых температур будет отличаться не более чем в 1,5 раза (табл. 1 и 2) [14].

Таблица 1

Термический коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} °С$^{-1}$

Марка стали	Температурный интервал, °С									
	20–100	20–200	20–300	20–400	20–500	20–600	20–700	20–800	20–900	20–1000
	Термический коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} °С$^{-1}$									
08кп*	12,5	13,4	14,0	14,5	14,9	15,1	15,3	14,7	12,7	13,8
08кп**	11,7	13,3	13,7	14,3	14,7	14,9	14,8	14,4	13,8	14,1
08Х18Н10*	16,5	17,2	17,7	18,1	18,3	18,6	19,0	19,5	19,7	20,0
08Х18Н10**	15,9	17,9	18,1	18,4	18,7	19,0	19,3	19,6	19,8	20,0

* – справочные данные; ** – экспериментальные данные.

Таблица 2

Модуль нормальной упругости *E*, ГПа

Марка стали	Температура, °С									
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
	Модуль нормальной упругости *E*, ГПа									
08кп	203	207	182	153	141	–	–	–	–	–
08Х18Н10*	198	194	189	181	174	166	157	147	–	–

* – приведены данные для стали 12Х18Н10Т.

Первичные композитные заготовки состояли из 100 чередующихся между собой листов указанных сталей толщиной 0,5 мм, по 50 каждой марки соответственно. По разработанному ранее экспериментальному технологическому маршруту, включающему мерную резку заготовок из листов, обработку их поверхности, сборку нарезанных листов в пакет, вакуумирование пакета и последующее пластическое деформирование методом горячей прокатки, были получены заготовки полосового сортамента шириной 100 и толщиной 10 мм [15].

Для проведения дилатометрических исследований из горячекатаной полосы были вырезаны образцы одинаковой длины – 10 мм, которая соответствовала толщине проката. Образцы вырезались в трех направлениях: вдоль направления проката (RD), в плоскости проката (TD) и в перпендикулярном плоскости проката направлении (ND).

Полученные после первого цикла полосы толщиной 10 мм были докатаны до толщины 2 мм, зачищены, собраны в пакет и в соответствии с описанным выше технологическим маршрутом прошли второй цикл обработки путем проведения горячей пакетной прокатки до толщины 10 мм. Образцы для дилатометрических исследований были получены аналогичным образом.

Таким образом, объекты исследования имели одинаковые размеры, но разное структурное строение: после первого цикла это были стослойные образцы, которые имели толщину единичного слоя 100 мкм, а после второго цикла, когда количество слоев составляло около 2000 шт., толщина слоя не превышала 5 мкм.

Измерения были выполнены на дилатометре DIL-402C производства фирмы Netzsch (Германия) с держателем и толкателем из корунда в интервале температур от 20 до 1200 ^{o}C при нагреве и охлаждении печи со скоростью 5 град/мин в атмосфере технически чистого аргона. Температура измерялась платина-платинородиевой термопарой (тип *S*), расположенной в непосредственной близости от образца, с погрешностью, не превышающей 5 °C.

Учитывая тот факт, что длина образцов не превышала 10 мм, для тарировки прибора и получения базовой линии дилатометра использовался самостоятельно изготовленный эталон из сплава «пирос» длиной 10 мм и диаметром 6 мм. Сравнение справочных данных по ТКЛР [14] и фактических данных образцов сталей, используемых в работе, полученных после тарировки дилатометра, приведены в табл. 1 и на рис. 2.

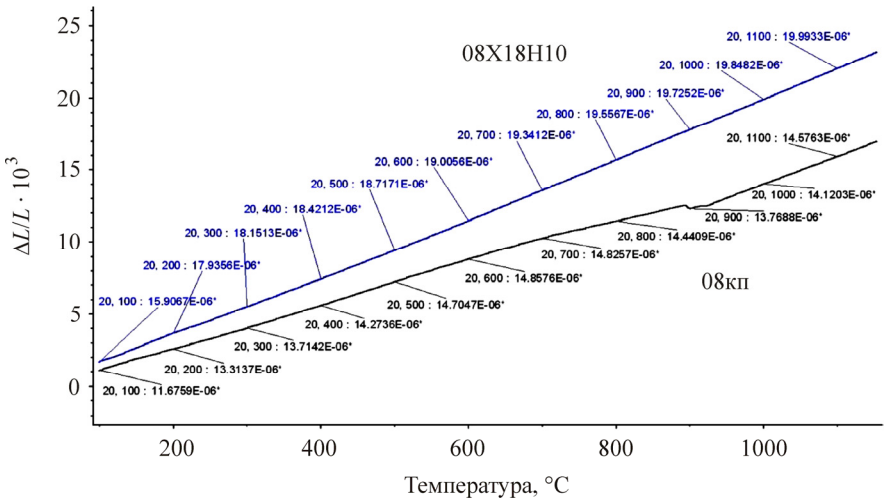

Рис. 2. Зависимость относительного удлинения при нагреве сталей 08Х18Н10 и 08кп с указанием фактических значений ТКЛР (технический)

Результаты эксперимента и их обсуждение

Проведенное дилатометрическое исследование показало, что начиная с температуры 400 °С исследуемый многослойный материал имеет аномально низкие значения относительного удлинения ($\Delta L/L$) в перпендикулярном к плоскости прокатки направлении ND. Одновременно с этим в плоскости этого же листового материала в направлениях RD и TD ход дилатометрической кривой, с незначительными отличиями, совпадает с трендом термического расширения стали 08Х18Н10. На рис. 3 можно видеть, что аномалия в направлении ND начинает проявляться при температурах теплой деформации, что совпадает с началом освобождения дислокаций от атмосфер примесных атомов в низкоуглеродистых сталях.

Здесь же можно видеть, что изменение относительного удлинения, обусловленное $\alpha \rightarrow \gamma$-переходом в стали 08кп, отчетливо фиксируется на дилатограмме ND. При этом на дилатометрических кривых, соответствующих направлениям RD и TD, этот переход практически незаметен.

Анализ температурной зависимости ТКЛР показывает, что $\alpha \rightarrow \gamma$-переход в направлении RD и TD, являясь весьма незначительным по сравнению с направлением ND (см. выноску на рис. 4), демонстрирует

сложные процессы, происходящие на границе раздела сталей, имеющих различные ТКЛР. Такое поведение позволяет говорить о том, что в исследуемом материале наблюдается сложная взаимосвязь нормальных и касательных напряжений на межслойных границах.

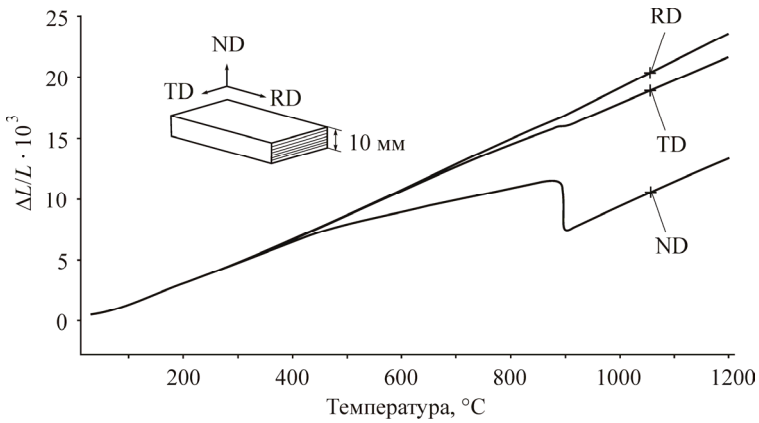

Рис. 3. Зависимость относительного удлинения при нагреве многослойного материала 08Х18Н10 + 08кп в направлениях RD, TD и ND (первый технологический цикл)

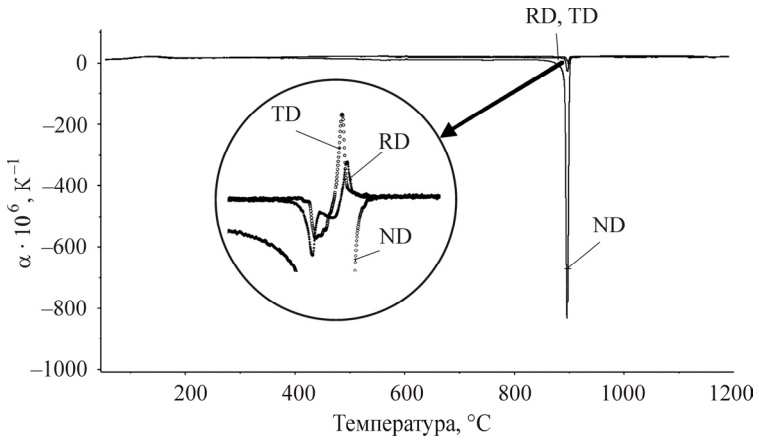

Рис. 4. Зависимость ТКЛР при нагреве многослойного материала 08Х18Н10 + 08кп в направлениях RD, TD и ND

Это предположение подтверждается необычно сильным влиянием, которое оказывают нормальные напряжения сжатия, возникающие в перпендикулярном плоскости проката направлении ND со стороны

стали с более высокими значениями ТКЛР, на ту составляющую многослойного материала (сталь 08кп), которая претерпевает α→γ-переход в процессе нагрева. Учитывая, что α→γ-переход в процессе нагрева стали 08кп происходит с уменьшением параметров кристаллической решетки, наблюдается усиление этого сжатия из-за наложения сжимающих напряжений со стороны слоев стали 08Х18Н10. Этот эффект более нагляден при сравнении дилатограмм нагрева образца стали 08кп и дилатограммы этой же стали в составе композиции многослойного материала (рис. 5). Визуально разница абсолютной величины линейной аномалии от α→γ-перехода, построенная в одном масштабе, составляет около 700 %.

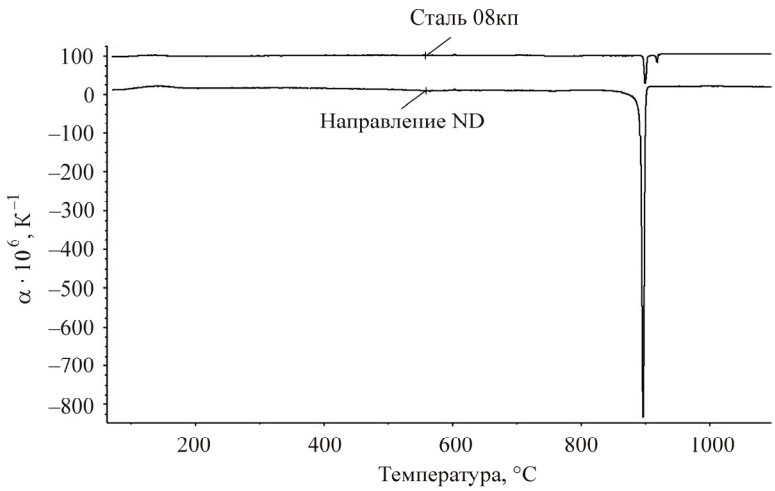

Рис. 5. Зависимость ТКЛР при нагреве стали 08кп и многослойного материала 08Х18Н10+08кп в направлении ND (дилатограмма стали 08кп, для устранения слияния кривых, смещена по вертикали вверх)

При этом такое же сильное действие, но уже растягивающего свойства со стороны слоев стали 08Х18Н10, возникающие напряжения оказывают на слои стали 08кп в направлениях RD и TD, что, как уже было сказано, вызывает практически полную компенсацию сжатия, обусловленную α→γ-переходом.

Схематично эта модель действующих напряжений, возникающих при нагреве многослойного материала, представлена на рис. 6.

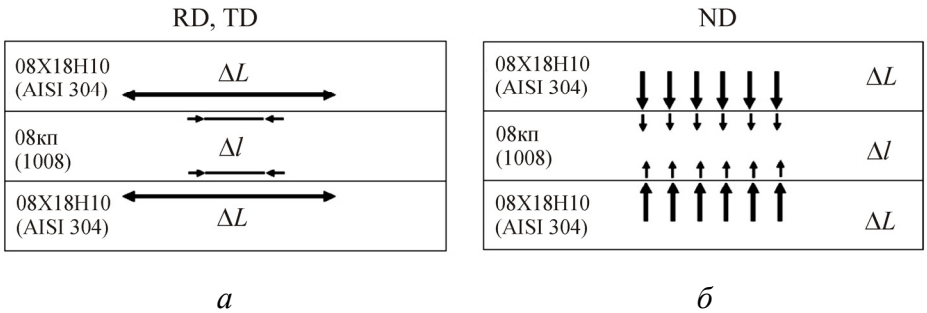

Рис. 6. Схема влияние касательных (*а*) и нормальных (*б*) напряжений на слои стали 08кп со стороны слоев стали 08Х18Н10

Еще более сильные изменения происходят в исследуемом материале после реализации двух технологических циклов обработки. На рис. 7 можно видеть, что изменился характер кривой ND. Отклонение от «базового» тренда дилатограмм RD, TD наблюдается уже при более высоких температурах. Одновременно с этим произошло уменьшение абсолютных значений ТКЛР не только направления ND, но и направлений RD и TD (табл. 3). Можно видеть, что «инварная» аномалия в направлении ND начинает проявляться при температуре 600 °С, достигает минимального значения $3{,}1\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$ к моменту окончания $\alpha\rightarrow\gamma$-перехода (800 °С) и возрастает до значения $8{,}3\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$ при 1200 °С.

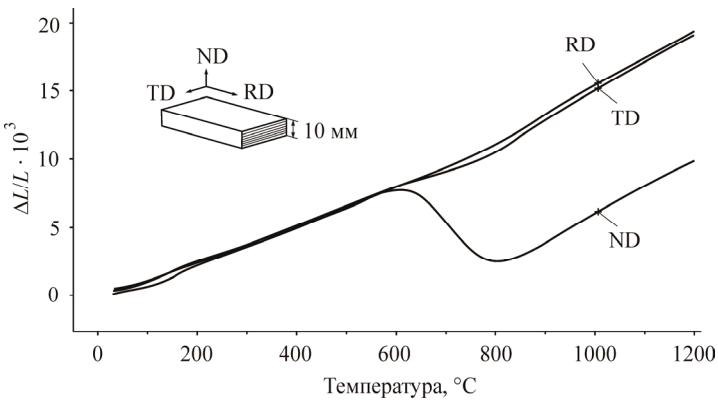

Рис. 7. Зависимость относительного удлинения при нагреве многослойного материала 08Х18Н10 + 08кп в направлениях RD, TD и ND (второй технологический цикл)

Таблица 3

Термический коэффициент линейного расширения α композиции 08Х18Н10 + 08кп, 10^{-6} °C^{-1}

Направления	Температурный интервал, °C										
	20–200	20–300	20–400	20–500	20–600	20–700	20–800	20–900	20–1000	20–1100	20–1200
	Термический коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} °C^{-1}										
100 слоев, толщина слоя 100 мкм											
RD	14,4	15,2	16,1	17,0	17,8	18,3	18,6	18,8	19,1	19,5	19,6
TD	14,6	15,2	16,1	17,0	17,6	17,8	17,9	17,6	17,7	17,8	17,9
ND	15,0	15,5	15,8	15,5	14,6	13,9	13,3	7,8	9,1	10,1	11,0
2000 слоев, толщина слоя 5 мкм											
RD	11,6	12,0	12,3	12,6	13,2	13,3	13,7	14,7	15,4	15,8	16,2
TD	11,7	11,8	12,3	12,6	13,0	12,7	12,9	14,1	14,9	15,4	15,8
ND	11,9	12,4	13,0	13,5	13,1	7,8	3,1	4,4	6,1	7,3	8,3

Такие изменения в поведении многослойного материала могут быть связаны с диффузионным перераспределением легирующих элементов, в первую очередь хрома как наиболее подвижного элемента замещения в данной системе легирования. Проведенные ранее исследования показали, что к окончанию второго технологического цикла средняя концентрация хрома в слоях многослойных материалов выравнивается до значения 9 % [16]. Анализ дилатограммы нагрева и охлаждения показывает, что есть тенденция изменения положения критических точек, о чем свидетельствует в первую очередь снижение температуры прямого γ→α-перехода в область мартенситного (бейнитного) превращения (рис. 8).

Другим, не менее важным фактором, влияющим на поведение многослойного материала при нагреве и деформации, является уменьшение толщины слоев при прокатке до некоторой критической величины. Такой критической величиной мы считаем толщину слоя, при которой наблюдается формирование так называемой «бамбуковой» структуры [17]. Этот фактор оказывается наиболее сложным в описании механизма взаимодействия напряжений, так как мы пока

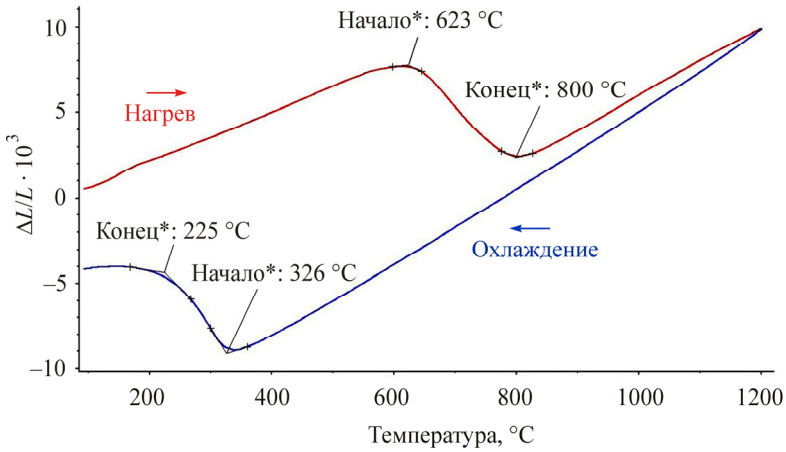

Рис. 8. Зависимость относительного удлинения при нагреве и охлаждении многослойного материала 08Х18Н10 + 08кп в направление ND (второй технологический цикл)

не можем оценить их величину и степень влияния на весьма ограниченный объем металла, заключенный между двумя границами.

Заключение

В работе представлено исследование многослойных металлических материалов, которые показывают анизотропный характер температурной зависимости ТКЛР от направления проводимого измерения – вдоль направления проката, в плоскости проката, перпендикулярно плоскости проката. Показано, что причиной такой анизотропии свойств являются напряжения, возникающие вследствие разности значений ТКЛР сталей, входящих в состав исходной композиции многослойного материала, а также тот факт, что указанные напряжения способны многократно влиять на объемные аномалии при $\alpha \rightarrow \gamma$-превращении. На основании исследования предложена модель, которая объясняет обнаруженное явление взаимодействием нормальных и касательных напряжений на межслойных границах многослойного материала.

Список литературы

1. Хоменко О.А. Происхождение и особенности инварных аномалий физических свойств. Fe–Ni-сплавы с ГЦК-решеткой // Физика металлов и металловедение. – 2007. – Т. 104, № 2. – С. 155–165.

2. Negative thermal expansion from 0.3 K to 1050 K in ZrW_2O_8 / T.A. Mary, J.S.O. Evans, T. Vogt, A.W. Sleight // Science. – 1996. – Vol. 272. – P. 90–92.

3. Бодряков В.Ю., Повзнер А.А. Инварное и коварное поведение простых ферромагнетиков: термодинамическое моделирование // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, вып. 2. – С. 65–71.

4. Структура и свойства инварного ГЦК-сплава Fe–35% Ni после комбинированной пластической деформации гидроэкструзией и волочением / В.М. Надутов, Д.Л. Ващук, П.Ю. Волосевич, В.А. Белошенко, В.З. Спусканюк, А.А. Давиденко // Физика и техника высоких давлений. – 2012. – Т. 22, № 2. – С. 125–137.

5. Особенности температурной зависимости теплового расширения и намагниченности насыщения инварного сплава Fe–67,0 %, Ni–32,5 %, Co–0,5 % с нанокристаллической структурой / Х.Я. Мулюков, И.З. Шарипов, И.Х. Биткулов, Р.Р. Мулюков // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, вып. 7. – С. 75–78.

6. Strain glass transition in a multifunctional b-type Ti alloy / Y. Wang, J. Gao, H. Wu, S. Yang, X. Ding, D. Wang, X. Ren, Y. Wang, X. Song, J. Gao // Sci. Rep. – 2014. – Vol. 4. – P. 1–5.

7. Invar-type effect induced by cold-rolling deformation in shape memory alloys / R. Kainuma, J.J. Wang, T. Omori, Y. Sutou, K. Ishida // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 80. – P. 4348–4350.

8. Tailored thermal expansion alloys / J. Monroe, D. Gehring, I. Karaman, R. Arroyave, D. Brown, B. Clausen // Acta Mater. – 2016. – Vol. 102. – P. 333–341.

9. Bensoussan A., Lions J.-L., Papanicolaou G.C. Asymptotic analysis for periodic structures. – Amsterdam, 1978. – 392 p.

10. Sanchez-Palencia E. Nonhomogeneous media and vibration theory // Lecture Notes in Physics. – 1980. – Vol. 127. – P. 397.

11. Almgren R.F. An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio // J. of Elasticity. – 1985. – Vol. 15. – P. 427–430.

12. Колпаков А.Г., Ракин С.И. К задаче синтеза композиционного материала одномерного строения с заданными характеристиками // Прикладная механика и техническая физика. – 1986. – № 6. – С. 143–150.

13. Колпаков А.Г., Ракин С.И. Деформационные характеристики слоистых композитов при нелинейных деформациях // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – № 5. – С. 157–166.

14. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

15. Плохих А.И. О возможности применения многослойных металлических материалов для изготовления баллонов высокого давления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – № 4. – С. 97–106.

16. Исследование влияния диффузионной подвижности легирующих элементов на стабильность структуры многослойных металлических материалов / А.И. Плохих, Д.В. Власова, О.М. Ховова, В.М. Полянский [Электронный ресурс] // Наука и образование: электрон. науч.-техн. изд. – 2011. – № 11. – URL: http://technomag.edu.ru/doc/262116.html (дата обращения: 16.03.2017).

17. Плохих А.И., Путырский С.В. Моделирование процесса пластической деформации многослойных металлических материалов // Известия Волгоград. гос. техн.

ун-та. Сер.: Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – 2014. – Т. 9, № 9(136). – С. 25–30.

References

1. Khomenko O.A. Proiskhozhdenie i osobennosti invarnykh anomalii fizicheskikh svoistv. Fe–Ni-splavy s granetsentrirovannoi kubicheskoi reshetkoi [Origin and features invarnykh of anomalies of physical properties. Fe – Ni - alloys with a face-centered cubic lattice]. *The Physics of Metals and Metallography*, 2007. Vol. 104, no. 2, 155–165 pp.

2. Mary T.A., Evans J.S.O., Vogt T., Sleight A.W. Negative thermal expansion from 0.3 K to 1050 K in ZrW2O8. *Science*, 1996. Vol. 272, 90–92 pp.

3. Bodriakov V.Iu., Povzner A.A. Invarnoe i kovarnoe povedenie prostykh ferromagnetikov: termodinamicheskoe modelirovanie [Invarny and artful behavior of simple ferromagnetics: thermodynamic modeling]. *Zhur-nal tekhnicheskoi fiziki*, 2007. Vol. 77, iss. 2, 65–71 pp.

4. Nadutov V.M., Vashchuk D.L., Volosevich P.Iu., Beloshenko V.A., Spuskaniuk V.Z., Davidenko A.A. Struktura i svoistva invarnogo granetsentrirovannogo kubicheskogo splava Fe–35% Ni posle kombinirovannoi plasticheskoi deformatsii gidroekstruziei i volocheniem [Structure and properties of invarny face-centered cubic Fe–35 alloy of % Ni after the combined plastic deformation by hydroextrusion and drawing]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*, 2012. Vol. 22, no. 2, 125–137 pp.

5. Muliukov Kh.Ia., Sharipov I.Z., Bitkulov I.Kh., Muliukov R.R. Osobennosti temperaturnoi zavisimosti teplovogo rasshireniia i namagnichennosti nasyshcheniia invarnogo splava Fe–67,0 %, Ni–32,5 %, Co–0,5 % s nanokristallicheskoi strukturoi [Features of temperature dependence of thermal expansion and magnetization of saturation of invarny Fe–67,0 alloy of %, Ni–32,5 of %, % Co–0,5 with nanocrystal structure]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2002. Vol. 72, iss. 7, 75–78 pp.

6. Wang Y., Gao J., Wu H., Yang S., Ding X., Wang D., Ren X., Wang Y., Song X., Gao J. Strain glass transition in a multifunctional b-type Ti alloy. *Science* Reports, 2014. Vol. 4, 1–5 pp.

7. Kainuma R., Wang J.J., Omori T., Sutou Y., Ishida K. Invar-type effect induced by cold-rolling deformation in shape memory alloys. *Applied Physics Letters*, 2002. Vol. 80. 4348–4350 pp.

8. Monroe J., Gehring D., Karaman I., Arroyave R., Brown D., Clausen B. Tailored thermal expansion alloys. *Acta Materialia*, 2016. Vol. 102, 333–341 pp.

9. Bensoussan A., Lions J.-L., Papanicolaou G.C. Asymptotic analysis for periodic structures. Amsterdam, 1978, 392 p.

10. Sanchez-Palencia E. Nonhomogeneous media and vibration theory. *Lecture Notes in Physics*, 1980. Vol. 127, 397 p.

11. Almgren R.F. An isotropic three-dimensional structure with Poisson's ratio. *Journal of Elasticity*, 1985. Vol. 15, 427–430 pp.

12. Kolpakov A.G., Rakin S.I. K zadache sinteza kompozitsionnogo materiala odnomernogo stroeniia s zadannymi kharakteristikami [To a problem of synthesis of composite material of a one-dimensional structure with the set characteristics]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaia fizika*, 1986, no. 6, 143–150 pp.

13. Kolpakov A.G., Rakin S.I. Deformatsionnye kharakteristiki sloistykh kompozitov pri nelineinykh deformatsiiakh [Deformation characteristics of layered composites at nonlinear deformations]. *Prikladnaia me-khanika i tekhnicheskaia fizika*, 2004, no. 5, 157–166 pp.

14. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Iu.V. Marochnik stalei i splavov [Marochnik staly and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 784 p.

15. Plokhikh A.I. O vozmozhnosti primeneniia mnogosloinykh metallicheskikh materialov dlia izgotovleniia ballonov vysokogo davleniia [About a possibility of use of multilayered metal materials for production of high-pressure tanks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, no. 4, 97–106 pp.

16. Plokhikh A.I., Vlasova D.V., Khovova O.M., Polianskii V.M. Issledovanie vlianiia diffuzionnoi podvizhnosti legiruiushchikh elementov na stabil'nost' struktury mnogosloinykh metallicheskikh materialov [A research of influence of diffusive mobility of the alloying elements on stability of structure of multilayered metal materials]. Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie, 2011, no. 11, available at: http://technomag.edu.ru/doc/262116.html (accessed 16 March 2017).

17. Plokhikh A.I., Putyrskii S.V. Modelirovanie protsessa plasticheskoi deformatsii mnogosloinykh metallicheskikh materialov [Modeling of process of plastic deformation of multilayered metal materials]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seria: Problemy materialovedeniia, svarki i prochnosti v mashinostroenii,* 2014. Vol. 9, no. 9(136), 25–30 pp.

Получено 30.04.2017

Об авторах

Плохих Андрей Иванович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения МТГУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: plokhikh@bmstu.ru.

Колесников Александр Григорьевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования и технологий прокатки МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: agk@bmstu.ru.

Сафонов Михаил Дмитриевич (Москва, Россия) – аспирант кафедры материаловедения МТГУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: MSafonov@bmstu.ru.

About the authors

Andrew I. Plokhikh (Moscow, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University; e-mail: plokhikh@bmstu.ru.

Alexander G. Kolesnikov (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Equipment and Technology of Rolling, Bauman Moscow State Technical University; e-mail: agk@bmstu.ru.

Mikhail D. Safonov (Moscow, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University; e-mail: MSafonov@bmstu.ru.