

Эволюция кристаллографической текстуры в титановом сплаве ВТ6, подвергнутом плоской прокатке

В. Д. Ситдигов^{1†}, И. В. Александров¹, В. Н. Даниленко², В. А. Попов², Р. М. Галеев²

[†]svil@mail.rb.ru

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса 12, Уфа, 450000, Россия

²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования эволюции кристаллографической текстуры в заготовках из титанового сплава марки ВТ6, подвергнутых плоской прокатке в исходном крупнокристаллическом и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях. УМЗ состояние формировали методом всесторонней изотермическойковки при температуре 650°C с числом циклов, равным 6. Плоская прокатка была проведена до степеней обжатия, равных 75% и 95% при температуре 550°C. В результате анализа прямых полюсных фигур установлено, что, в отличие от крупнокристаллического состояния, плоская прокатка УМЗ состояния способствует росту доли тех зерен, у которых базисная плоскость практически параллельна к плоскости прокатки. Моделирование прямых полюсных фигур в рамках вязкопластической самосогласованной модели, реализованной в рамках модели Воце, позволило установить активные системы скольжения и/или двойникования в зависимости от степени обжатия при плоской прокатке. Показано, что наиболее активными системами при плоской прокатке исследуемого сплава в исходном состоянии являются призматические системы скольжения, а также системы двойникования растяжением и сжатием. В то же время при больших степенях обжатия при плоской прокатке наблюдается дислокационная активность по базисным и пирамидальным $\langle a \rangle$ системам скольжения. В случае УМЗ состояния, кроме призматических систем, действуют пирамидальные $\langle a+c \rangle$ первого порядка и базисные системы скольжения. Процессы двойникования растяжением и сжатием также реализуются на начальных этапах плоской прокатки, однако их активность достаточно низка при больших степенях деформации.

Ключевые слова: кристаллографическая текстура, титановый сплав ВТ6, УМЗ структура, всесторонняя изотермическаяковка, плоская поперечная прокатка

Evolution of crystallographic texture in titanium VT6 alloy subjected to plane cross rolling

V. D. Sitdikov¹, I. V. Alexandrov¹, V. N. Danilenko², V. A. Popov², R. M. Galeev²

¹Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russia

²Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., Ufa, 450001, Russia

This work presents the results of experimental studies and computer modeling of the crystallographic texture evolution in the billets of titanium alloy VT6, subjected to plane rolling in the coarse-grained and ultrafine-grained (UFG) states. UFG state has been formed by the method of multiaxial isothermal forging at 650°C with the number of cycles equal to 6. Plane rolling was performed until the reduction equal to 75% and 95% at 550°C. The analysis of pole figures revealed that plane rolling of UFG state, unlike in the coarse-grained state, promotes the orientation of grains with basal plane substantially parallel to the rolling plane. Modeling of pole figures within the viscoplastic self-consistent model, implemented in the Voce framework, allowed to determine the active slip and/or twinning systems depending on the reduction at plane rolling. It is shown that prismatic slip system, tensile and compression twinning systems are the most active systems at plane rolling of the investigated alloy in the coarse-grained state. At the same time, the dislocation activity of the basal and pyramidal $\langle a \rangle$ slip systems is observed at high degrees of reduction at plane rolling. In the case of UFG state, prismatic, pyramidal $\langle a+c \rangle$ of the first order and the basal slip systems are active. The processes of tensile and compression twinning are also implemented in initial stages of plane rolling, but their activity is rather low at high degrees of deformation.

Keywords: crystallographic texture, titanium VT6 alloy, UFG structure, multiaxial isothermal forging, plane cross rolling

Введение

Результаты многочисленных исследований показали, что применение методов интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет сформировать УМЗ структуру в объемных образцах различных металлов и сплавов. Кроме традиционных методов ИПД, таких как равноканально — угловое прессование (РКУП) и интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК), для формирования УМЗ структуры также активно используется метод всесторонней изотермическойковки (ВИК), позволяющий получать массивные заготовки в форме цилиндра [1—3]. В то же время, для широкого внедрения УМЗ металлических материалов в промышленности необходимо проводить дополнительную обработку, например методом плоской прокатки, придавая заготовкам форму листа.

Одним из широко используемых материалов в авиационной и космической промышленности, машиностроении, медицине и приборостроении является титановый сплав марки ВТ6. Прокатанный сплав характеризуется измельченной структурой и развитой кристаллографической текстурой [4]. Кристаллографическая текстура определяет эксплуатационные свойства металлов и сплавов, являясь во многих случаях основным фактором, способствующим достижению в них наилучшего уровня физико-механических свойств.

Рентгеноструктурный анализ (РСА), дающий возможность успешно контролировать изменения кристаллографической текстуры и устанавливать механизмы деформации (действующие системы скольжения и двойникования), является важным инструментом исследования металлических материалов. Известно, что кристаллографическое скольжение и деформационное двойникование определяют характер преимущественной ориентации зерен, т.е. кристаллографической текстуры, в металлических материалах [4]. Анализ формирующихся кристаллографических текстур с помощью моделирования является важным инструментом исследования механизмов пластической деформации в металлах и сплавах.

Влияние плоской прокатки на эволюцию кристаллографической текстуры титана и его сплавов являлось предметом многочисленных исследований, например [5—7]. В работе [5] было показано, что в холоднокатаном титане формируются три типа преимущественных ориентировок. Ориентировки $\{0002\}\langle 0110 \rangle$ первого типа присутствуют во всем интервале степеней обжатия от 5% до 90%. Ориентировки $\{2\bar{1}10\}\langle 01\bar{1}0 \rangle$ второго типа присутствуют при степенях обжатия от 5% до 50%. Ориентировки $\{2\bar{1}15\}\langle 01\bar{1}0 \rangle$ третьего типа формируются при высоких степенях деформации.

Исследование уширения рентгеновских пиков показало, что формирование ориентировок $\{2\bar{1}15\}\langle 01\bar{1}0 \rangle$ осуществляется как за счет деформации скольжением, так и двойникования [5]. В то же время формирование ориентировок $\{2\bar{1}10\}\langle 01\bar{1}0 \rangle$ и $\{0002\}\langle 0110 \rangle$ осуществляется в основном за счет действия скольжения. Также было установлено, что при комнатной температуре вклад двойникования в общую деформацию составляет

40,5%. При температуре деформации выше 300 °С вклад двойникования уменьшается и составляет менее 5%. Деформация, осуществляемая кристаллографическим скольжением, резко возрастает с ростом температуры. Расчет весового фактора показал, что при деформации прокаткой на 10% главными системами скольжения являются призматические $\langle a \rangle$ и пирамидальные $\langle a+c \rangle$. В интервале от 20 °С до 300 °С активность систем скольжения $\langle a+c \rangle$ выше, чем систем $\langle a \rangle$ и возрастает с увеличением температуры. Данное изменение является зеркальным отображением уменьшения активности систем двойникования в указанном интервале температур. Возрастание активности систем скольжения $\langle a+c \rangle$ требует обеспечения деформации вдоль оси с, поскольку двойникование в интервале от 20 °С до 300 °С подавляется. В интервале от 300 °С до 720 °С наблюдается изменение активности систем двойникования и преобладание призматических систем скольжения над пирамидальными [6,7].

В случае УМЗ материалов ожидается, что чрезвычайно малый размер зерен и высокая протяженность границ зерен приведут к активизации новых механизмов деформации. В результате будут действовать новые системы скольжения и/или двойникования, что приведет к формированию компонент текстуры, нехарактерных для данных материалов в крупнокристаллическом состоянии.

Целью данной работы было изучение кристаллографической текстуры в титановом сплаве ВТ6, подвергнутом плоской прокатке в исходном состоянии и УМЗ состоянии, полученном ВИК.

Материал, методика эксперимента и моделирования

Титановый сплав ВТ6 (содержание в объемных процентах Fe до 0,3; С до 0,1; Si до 0,15; V до 5,3; N до 0,05; Ti до 91,2; Al до 6,8; Zr до 0,3; O до 0,2; H до 0,015) со средним размером зерен 10 мкм, полученным в результате отжига при температуре 700 °С в течение 5 часов, был выбран в качестве исходного материала. Заготовки сплава имели форму прямоугольного параллелепипеда с длиной 250 мм и квадратным основанием с ребром 11 мм. Заготовки были подвергнуты ВИК при температуре 650 °С с числом циклов, равным 6. Заготовки были подвергнуты плоской поперечной прокатке на прокатном стане ЛИС 6/200 со степенями обжатия 75% и 95% при температуре 550 °С. После каждого трех проходов заготовку поворачивали на угол 90° и подвергали следующим трем проходам. При этом конечная толщина заготовки уменьшилась с 12,0 мм до 0,8 мм.

Текстурный анализ проводили с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в Cu K α 1 излучении ($\lambda=0,154060$ нм) при напряжении 45 кВ и токе 40 мА. При проведении текстурных исследований съемку на отражение проводили в пределах изменения радиального угла γ от 0° до 75° и азимутального угла δ от 0° до 360°. Диаметр облучаемой области составлял около 3 мм. Исследовали область в геометрическом центре в плоскости прокатки заготовки. Полные полюсные фигуры (ПФ) строили, ос-

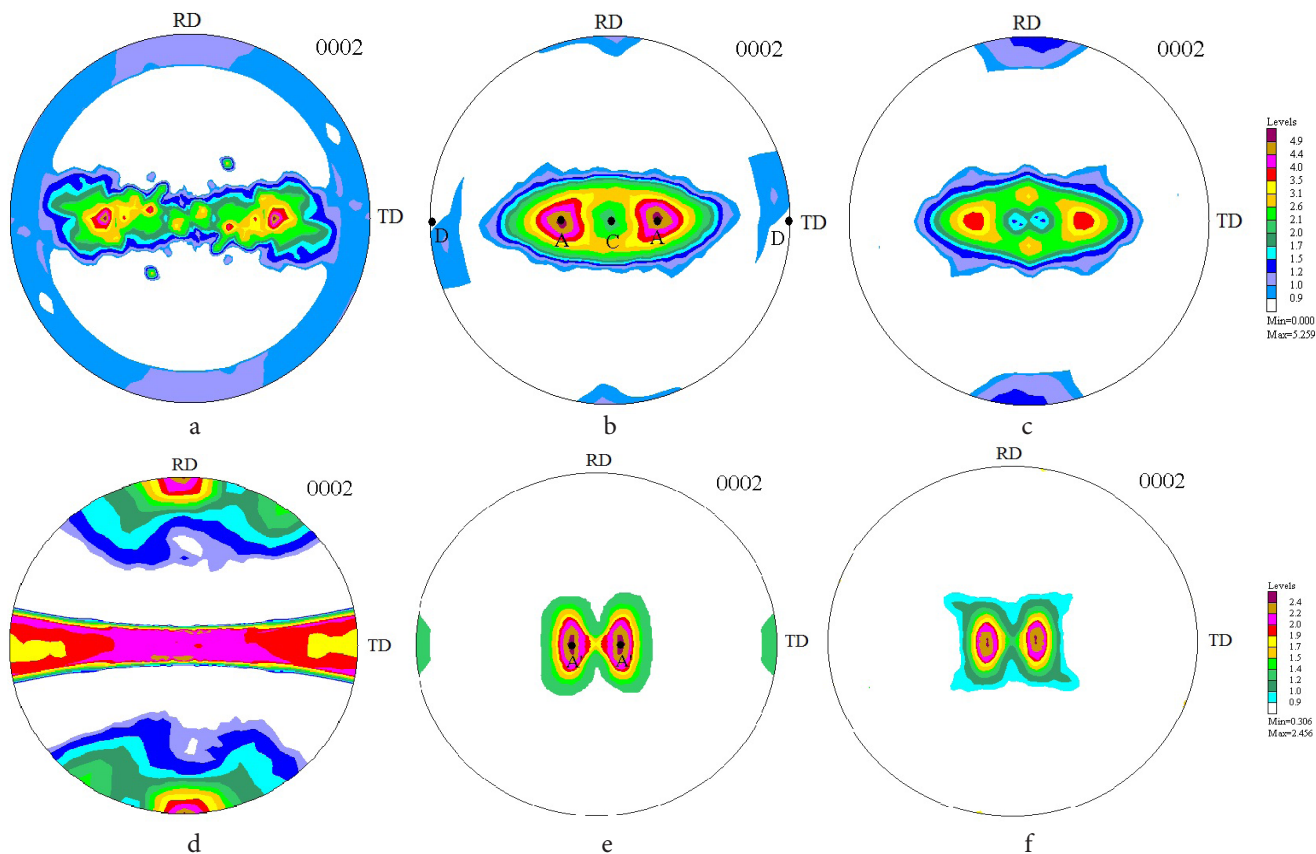


Рис. 1. Экспериментальные ПФ (0002) для титанового сплава ВТ6 в различных состояниях: (а) КК; (б) КК с последующей прокаткой (степень обжатия 75%); (с) КК с последующей прокаткой (степень обжатия 95%); (д) УМЗ; (е) УМЗ с последующей прокаткой (степень обжатия 75%); (ф) УМЗ с последующей прокаткой (степень обжатия 95%).

Fig. 1. Experimental PF (0002) of titanium alloy VT6 in different states: (a) coarse-grained; (b) coarse-grained, followed by rolling (75% reduction); (c) coarse-grained, followed by rolling (95% reduction); (d) UFG state, (e) UFG followed by rolling (75% reduction); (f) UFG, followed by rolling (95% reduction).

новываясь на результатах съемки неполных ПФ для плоскостей $(10\bar{1}0)$, (0002) и $(10\bar{1}1)$. Результаты экспериментальных исследований представляли в виде полных ПФ, рассчитанных с использованием пакета программ LaboTEX (www.labosoft.com.pl).

Моделирование процессов текстурообразования проводили в рамках вязкопластической самосогласованной (ВПСС) модели [4]. Для выявления активных систем скольжения, которые являются ответственными за появление тех или иных максимумов на ПФ, на основе литературного анализа были выбраны наиболее типичные для титана с ГПУ-решеткой семь систем скольжения и двойникования. К этим системам относятся: базисные $\{0001\}\langle\bar{1}\bar{1}20\rangle$, призматические $\{10\bar{1}0\}\langle\bar{1}2\bar{1}0\rangle$, пирамидальные 1го рода $\{10\bar{1}1\}\langle\bar{1}2\bar{1}0\rangle$, пирамидальные 1го рода $\{10\bar{1}1\}\langle\bar{1}\bar{1}23\rangle$ и 2го рода $\{11\bar{2}2\}\langle\bar{1}\bar{1}23\rangle$ системы скольжения, а также системы двойникования растяжения $\{10\bar{1}2\}\langle\bar{1}011\rangle$ и сжатия $\{2\bar{1}\bar{1}2\}\langle2\bar{1}\bar{1}3\rangle$.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные ПФ (0002) для титанового сплава в различных исследованных состояниях представлены на рис.2. В центральной области ПФ исходного состоя-

ния наблюдаются два симметричных текстурных максимума, относящиеся к ориентировке $\{01\bar{1}0\}\langle10\bar{1}0\rangle$. Небольшое усиление текстурных максимумов наблюдается также в верхней и нижней областях ПФ (0002) с ориентировкой $\{01\bar{1}0\}\langle0001\rangle$ (рис.1а). Расположение текстурных максимумов на ПФ (0001) в исходном состоянии (рис.1а) подобно тому, что наблюдается при прокатке [4] и обусловлено термомеханическим процессом получения исходного прутка.

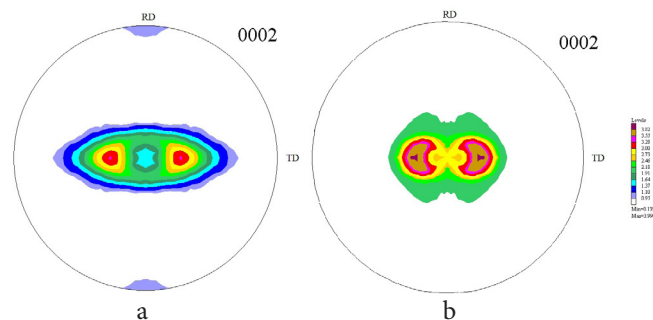


Рис. 2. Модельные ПФ (0002) для титанового сплава ВТ6, подвергнутого плоской прокатке со степенью обжатия 95%: (а) КК состояние; (б) УМЗ состояние.

Fig. 2. Model PF (0002) of titanium alloy VT6 subjected to plain rolling to 95% reduction: (a) coarse-grained state; (b) UFG state.

В случае прокатки исходных заготовок до степени обжатия 75% ПФ (0002) характеризуется двумя симметричными максимумами, расположенными в центральной области ПФ и относящимися к ориентировке А $\{\varphi_1=0^\circ, \Phi=40^\circ, \varphi_2=0^\circ\}$, где φ_1 , Φ и φ_2 — углы Эйлера (рис.1b). В центре ПФ также наблюдается максимум с ориентировкой С $\{\varphi_1=0^\circ, \Phi=0^\circ, \varphi_2=30^\circ\}$, а на периферии около оси поперечного направления (ПН) расположены еще два максимума с ориентировкой D $\{\varphi_1=0^\circ, \Phi=90^\circ, \varphi_2=0^\circ\}$. Увеличение степени обжатия при прокатке до 95% приводит к усилению ориентировок А и D с одновременным подавлением ориентировки С (рис.1с). Подобная тенденция также наблюдалась в работе [6], где данный факт был объяснен сменой механизмов деформации, приводящих к ограничению деформации двойникованием.

Экспериментальная ПФ (0002) УМЗ состояния, сформированного в результате всестороннейковки (рис.1d), характеризуется 8 главными максимумами, расположенными на периферии ПФ и фиброй, ориентированной вдоль продольной оси ПН. Расположение текстурных максимумов подобно тому, что наблюдается при осадке [4].

Плоская прокатка приводит к совершенно другому типу текстуры (рис.1e,f). Характер расположения всех текстурных максимумов на ПФ (0002) указывает на то, что базисные плоскости ориентированы по отношению к плоскости прокатки на угол 20° . Сравнительный анализ прокатанных заготовок сплава титана в исходном (состояние поставки) и УМЗ состояниях выявил ряд закономерностей. В случае плоской прокатки УМЗ состояния со степенью обжатия 75% в центре ПФ (0001) наблюдаются преимущественно два основных максимума, относящиеся к ориентировке А' $\{\varphi_1=0^\circ, \Phi=20^\circ, \varphi_2=0^\circ\}$. Последнее свидетельствует о том, что в отличие от крупнокристаллического состояния, в случае прокатки УМЗ состояния возрастает доля тех зерен, базисная плоскость которых практически параллельна плоскости прокатки.

Таким образом, в исходном состоянии наклон базисной плоскости к плоскости прокатки составляет 40° , а в УМЗ состоянии после прокатки этот угол составляет 20° . Увеличение степени обжатия при прокатке до 95% приводит к усилению полюсной плотности ориентировки А', что свидетельствует об увеличении объемной доли зерен, у которых плоскость базиса наклонена на угол 20° по отношению к плоскости прокатки.

Интерпретация полученных экспериментальных кристаллографических текстур представляет значительную сложность, поскольку не позволяет установить действующие системы скольжения или двойникования. В связи с этим был проведен анализ процессов текстуробразования в рамках ВПСС модели.

На рис.2 представлены результаты моделирования процессов текстуробразования при плоской прокатке сплава ВТ6, когда возможно действие рассматриваемых систем скольжения и двойникования.

Сопоставление результатов эксперимента (рис.1) и моделирования (рис.2) в соответствующих состояниях указывает на хорошее соответствие между ними.

В результате моделирования процессов текстурооб-

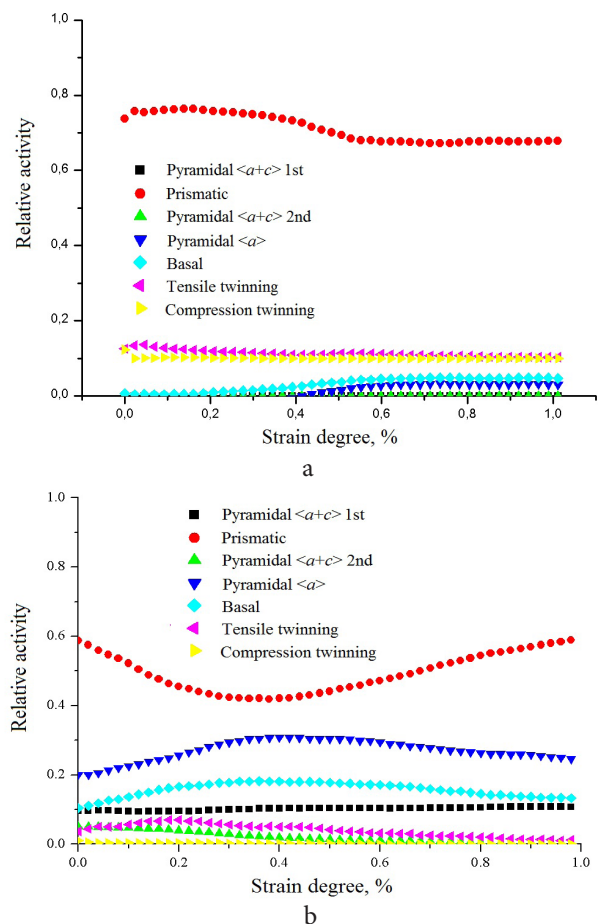


Рис. 3. Относительная активность систем скольжения и двойникования в зависимости от степени обжатия при прокатке титанового сплава: (а) КК состояние; (б) УМЗ состояние.

Fig. 3. The relative activity of the slip and twinning systems depending on the reduction at rolling of titanium alloy: (a) coarse-grained state; (b) UFG state.

разования при плоской прокатке были установлены активные системы скольжения и двойникования (рис.3).

При прокатке исходного состояния наиболее активными являются призматические системы скольжения, а также системы двойникования растяжением и сжатием. Скольжение дислокаций по базисным и пирамидальным плоскостям ограничено (рис.5a). В отличие от исходного состояния в случае прокатки УМЗ состояния по-прежнему наиболее активными системами скольжения остаются призматические (рис.3b). В то же время наблюдается активность скольжения дислокаций по пирамидальным и базисным системам скольжения. Процессы двойникования растяжением и сжатием также реализуются на начальных этапах прокатки, однако их активность достаточно низкая при больших степенях деформации (рис.3b).

Закключение

В результате исследования эволюции кристаллографической текстуры в титановом сплаве ВТ6 при плоской прокатке со степенью обжатия 75% установлено,

что в случае исходного состояния плоскость базиса повернута по отношению к плоскости прокатки на угол 40° , а случае УМЗ структуры разворот составляет 20° . В исходном состоянии увеличение степени обжатия плоской прокатки до 95% приводит к усилению компонент А и D с одновременным подавлением ориентировки С, а в УМЗ состоянии наблюдается усиление доли компоненты А'. Наиболее активными системами при прокатке исходного состояния являются призматические системы скольжения, а также системы двойникования растяжением и сжатием, а в случае УМЗ состояния, кроме призматических систем, действуют пирамидальные и базисные системы. Процессы двойникования растяжением и сжатием в случае УМЗ структуры ограничены.

Благодарность. Работа была выполнена в рамках проекта № 14-08-97052 р_поволжье_а Российского фонда фундаментальных исследований.

Acknowledgements. The work was done within the project № 14-08-97052 of the Russian Foundation for Basic Research.

Литература / References

1. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov. Progress in Materials Science. **45**, 103—189 (2000).
2. R.Z. Valiev, T.G. Langdon. Progress in Materials Science. **51**, 881—981 (2006).
3. R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov. Objomnye nanostrukturnye metallicheskie materialy. M. Akademkniga. (2007) 398 p. (in Russian) [P.З. Валиев, И.В. Александров. Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Академкнига (2007) 398 с.]
4. U.F. Kocks, C.N. Tome, H.R. Wenk. Texture and anisotropy: preferred orientations in polycrystals and their effect on materials properties. Cambridge. Cambridge University Press. (1998) 676 p.
5. A. Weidner, P. Klimanek. Mater. Sci. Eng. A. **234–236**, 814—817 (1996).
6. N. Bozzolo, N. Dewobroto, H. Wenk, F. Wagner. J. Mat. Sci. **42**, 2405—2416 (2007).
7. M.G. Glavicic, A.A. Salem, S.L. Semiatin. Acta Mater. **52**, 647—655 (2004).