УДК 621.77

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

М.Н. КокоевКАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Х.М. БЕРБЕКОВА

В поисках новых способов повышения прочности металлов без потери пластичности исследуют, в частности, метод кручения металлов под квазигидростатическим давлением (torsion under quasi-hydrostatic pressure – SPD). Подвергая металлы интенсивной пластической деформации удается получать образцы с нано- или микроструктурой. Предложен новый метод изготовления длинномерных полуфабрикатов из металлов и сплавов, упрочненных при помощи интенсивной пластической деформации заготовок кручением под давлением. В новом методе SPD металл подвергается трём воздействиям одновременно: сжатию высоким давлением, кручению и высокочастотной ковке. Под действием интенсивной деформации вследствие кручения под высоким давлением сильно измельчается зерно. Во-вторых, вследствие высокочастотнойковки осуществляется дискретное продвижение заготовки и устраняются микроразрывы и поры в металле. В-третьих, в результате совместного и одновременного действия указанных факторов происходит сварка заготовок между собой. Таким образом, можно получить микрокристаллические образцы очень большой длины, из которых последующей обработкой можно изготовить проволоку и профили с высокими прочностью и пластичностью для специальных применений.

Ключевые слова: несущие кабели, интенсивная пластическая деформация, кручение под высоким давлением, новый метод, длинная заготовка.

Со времени триумфа нобелевского лауреата Перси Бриджмена, выдающегося пионера экспериментальной физики высоких давлений, прочность основных конструкционных материалов выросла не на порядок, а только на десятки процентов. Исключение составляют очень немногие материалы, для которых прочность увеличилась в два-три раза. Это в основном не металлы. Для сравнения, в радиоэлектронике, например, за это же время некоторые важные параметры приборов (чувствительность, коэффициент усиления, быстродействие, выходная мощность) увеличились на два-три порядка. Это следствие того, что теоретическая прочность металлов определяется расчетами проч-

A PROSPECTIVE METHOD FOR PRODUCING METALS WITH HIGH STRENGTH AND PLASTICITY

M.N. KokoevKABARDINO-BALKAR STATE UNIVERSITY
NAMED AFTER H.M. BERBEKOV

In search of the new ways to increase strength without loss of ductility, the method of torsion of metals under quasi-hydrostatic pressure is investigated. Subjecting metals of this kind to severe plastic deformation (SPD), it is possible to obtain samples with a nano- or microstructure. A new method is proposed for the manufacture of long semi-finished products from metals and alloys hardened by means of intensive plastic deformation of workpieces by torsion under pressure. In the new SPD method, metal is subjected to three influences simultaneously - high pressure compression, torsion and high-frequency forging. Under the action of intense deformation due to torsion under high pressure, the grain is greatly crushed. Secondly, due to high-frequency forging, discrete advancement of the workpiece is carried out and micro-fractures and pores in the metal are eliminated. Thirdly, as a result of the combined and simultaneous action of these factors, the workpieces are welded together. Thus, it is possible to obtain a nano- or microcrystalline sample of a very large length, which can be used for further processing to produce a wire and profiles with high strength and ductility suitable for special applications.

KEYWORDS: load-bearing cables, severe plastic deformation, torsion under pressure, a new method, long workpiece.

DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-4-53-56

ности кристаллической решетки – такого же фундаментального параметра как и температура плавления. Вариации температуры плавления могут быть, но в таком случае причины известны: вещество недостаточно чисто, либо внешние условия плавления отклоняются от нормальных условий.

С начала 1950-х годов материаловеды начали интенсивно исследовать нитевидные кристаллы (вискерсы), природные образцы которых были известны с XVI века. Они надеялись, что нитевидные кристаллы (НК) помогут сделать прорыв на пути к повышению прочности материалов. Длина НК (вискерсов) достигает 5 мм, редко нескольких сантиметров, а диаметр

– от 0,5 до 50 мкм [1]. Размерный эффект при уменьшении диаметра приводит к практическому исчезновению дислокаций и к почти идеальной поверхности, что увеличивает прочность в сотни раз по сравнению с массивными (обычными) монокристаллами. Прочность искусственно полученных вискерсов поражала. Например, временная прочность на разрыв обычного железа высокой чистоты около 0,09–0,14 ГПа (9–14 кгс/мм²), а прочность НК железа достигает 13 ГПа (1300 кгс/мм²), то есть прочность НК железа превышает прочность обычного железа в 100–140 раз. А прочность НК графита достигает фантастической величины – 21 ГПа (2100 кгс/мм²).

Но у нитевидных кристаллов при высокой прочности оказались низкие пластические свойства. Кроме того, их стоимость производства очень высока. Причем при росте диаметра НК очень быстро падали показатели прочности – всё в соответствии с теорией. Поэтому НК находят в технике ограниченное применение. Например, НК в виде SiC, Al₂O₃, B₄C, AlN и др. используются для армирования композитов. А интерметаллические соединения типа NiAl применяют для создания лопаток газовых и реактивных турбин [8].

Прочность материалов определяет прогресс во многих областях: энергетике, авиации, в строительстве. Например, известен выдающийся японский висячий мост Акаси-Кайкё [3]. Мост имеет центральный пролет длиной 1991 м. В конструкции моста имеется система двухшарнирных балок жёсткости, позволяющая выдерживать скорости ветра до 80 м/с и землетрясения с магнитудой до 8,5. Главный кабель моста Акаси-Кайкё состоит из сборных заводских прядей. Каждая прядь состоит из оцинкованных проволок. Высокопрочная проволока с пределом прочности на растяжение 1,8 ГПа (180 кгс/мм²) была предпочтена проектировщиками применению стандартной проволоки с пределом прочности 1,6 ГПа. Очевидно, она более пластична. Для ответственных сооружений важна высокая пластичность, так как благодаря пластичности выравниваются и уменьшаются механические напряжения в сооружении [4]. В последнее время в висячих мостах применяют проволочные канаты из высокопрочной стали с пределом прочности около 2–2,5 ГПа, что заметно снижает собственный вес моста. К сожалению, относительное удлинение этой проволоки при разрыве не превышает 4–5%.

У первого в мире вантового железнодорожного моста в Белграде канаты вант изготовлены из параллельных проволок диаметром 7 мм. Чем тоньше проволока в прядях, тем выше их относительная прочность. Проволочные канаты заключены в полиэтиленовые трубки диаметром 180 мм при толщине стенки полимера 12 мм [9]. Эта конструкция вант применялась в строительстве вантовых мостов впервые и затем стала преобладающей при проектировании вантовых мостов во всем мире, поскольку

толстый полиэтилен хорошо защищает оцинкованную сталь от коррозии.

Необычные свойства аморфных металлов (близкая к теоретической прочность, высокая твердость и коррозионная стойкость) тоже привлекли внимание материаловедов. Аморфные металлы характеризуются высокой вязкостью разрушения и высоким пределом текучести, существенно больших, чем в кристаллических аналогах. Но возможность практического применения этих материалов ограничивается совсем малыми размерами образцов. К тому же, аморфные сплавы отличаются низкой термостабильностью. Поэтому образцы аморфных сплавов не удастся получить в виде существенной по размерам заготовки. Для получения заготовок из аморфных металлов пытаются компактировать тонкие аморфные ленты кручением под высоким давлением при комнатной температуре.

Впервые метод интенсивной пластической деформации (ИПД) кручением под высоким давлением для разных веществ был предложен Перси У. Бриджменом в 1930-х годах [6]. Метод ИПД кручением под давлением осуществляется путём одновременного сильного сжатия тонкого образца между двумя бойками и его кручения благодаря повороту нижнего бойка на определённый угол. Прилагаемое давление, достигающее 5–10 ГПа (50–100 тысяч бар), играет две роли. Во-первых, давление создаёт в центральной части тонкого образца область квазигидростатического сжатия, препятствующего разрушению вещества. Во-вторых, увеличивает силу трения между бойками и образцом. В результате крутящий момент от нижнего бойка передаётся образцу, и он деформируется кручением.

Размер образцов до деформации по Бриджмену обычно не превышает среднюю, а иногда малую монету. После деформации высота образцов уменьшается до 0,2–1 мм. Измельчение зерна наблюдается уже после начала кручения, но для создания однородной наноструктуры требуется, как правило, деформация в несколько оборотов. В работах Корзниковой Г.Ф., Чеппе Т., Корзниковой Е.А. [2] фрагменты аморфных лент деформировались кручением на наковальне Бриджмена под давлением 7 ГПа. Полученные образцы имели толщину около 0,2 мм и диаметр около 6 мм. Подвергая металлы разного рода интенсивной пластической деформации, удастся получать небольшие образцы с наноструктурой.

Вообще, наноструктурными металлами (НС-металлами) принято называть металлы с содержанием более 50% зерен, имеющими размер менее 100 нм. В металлах, обрабатываемых традиционными методами термомеханической обработки, размеры зерен обычно находятся в диапазоне 10–100 мкм. Вследствие отсутствия промышленной технологии НС-металлы пока применяются только для относительно небольших изделий ответственного назначения: для изготовления медицинских имплантатов из титана

или высоконагруженных не слишком крупных деталей из различных сплавов для авиастроения. Металлы с микроструктурой обладают в 1,5–2 раза более высокой прочностью. Особенно важно то, что металлы сохраняют большое относительное удлинение при разрыве, то есть более пластичны. Многие НС-металлы имеют более высокую коррозионную стойкость, чем металлы такого же химического состава, но с более крупным зерном [12].

Таким образом, существующие методы ИПД, с помощью которых можно получить НС-металлы, не позволяют изготавливать большие заготовки [11]. Наиболее широко применяемый метод ИПД, так называемый метод равноканального углового прессования (РКУП), позволяет изготовить наноструктурные заготовки длиной до 250 мм. Метод был предложен В.М. Сегалом в 1973 г. в Минске [14]. Метод РКУП заключается в продавливании материала через наклонные каналы с одинаковой площадью поперечного сечения. Заготовка проходит через вертикальный и повернутый, например, под прямым углом, второй канал. Металл продавливают через каналы несколько раз с тем, чтобы добиться максимального измельчения зерен металла [10]. Аналогичное сильное действие на структуру металла производят многие модификации метода ИПД.

Новый метод изготовления длинномерных полуфабрикатов из металлов, упрочненных при помощи ИПД заготовок кручением под давлением, разработан с участием российских ученых в Федеральном научном центре Германии. Исследования начали с экспериментальной проверки одного из новых методов ИПД [13, 15]. На втором этапе разработали и экспериментально проверили новую технологию получения длинномерных микроструктурных полуфабрикатов.

Заготовку помещают в три соосно составленных контейнера высокого давления и сжимают с помощью прессы до превышения предела упругости металла заготовки. При неподвижных верхнем и нижнем контейнерах вращают средний контейнер вокруг продольной оси, подвергают сжатую заготовку непрерывному кручению в двух поперечных сечениях. Средний контейнер медленно вращается от регулируемого электродвигателя через червячный редуктор и цепную передачу, поскольку ведомая звездочка большого диаметра охватывает средний контейнер и прикреплена к нему. Подробно экспериментальная установка описана в Европейском патенте [7].

Реализованный вариант экспериментальной установки был без встроенного в пресс небольшого гидромолота для высокочастотнойковки по двум причинам: во-первых, рядом расположены лаборатории с точными приборами, которым противопоказаны сильные колебания; во-вторых, одна из проблем интенсивной обработки – отвод избыточного тепла от заготовки. Проблема ждёт своего оптимального ре-

шения. Действительно, наибольший вклад в нагрев заготовки вносит высокочастотная ковка. Как показывают расчеты, при высокочастотной ковке заготовка нагревается выше температуры рекристаллизации. Пока не найден ответ, как ее охлаждать в контейнере высокого давления при приемлемой производительности обработки.

После запрессовки первой заготовки в верхний контейнер помещают следующую заготовку, пуансоном плотно прижимают её к предыдущей заготовке. Одновременно со сжатием и кручением по заготовке наносят частые удары встроенным в установку гидромолотом. Высокочастотная ковка необходима, особенно при промышленной обработке заготовок стальных сплавов и сплавов титана.

Под действием ИПД вследствие кручения под высоким давлением и высокочастотнойковки в зоне контакта между заготовками выделяется тепло. При этом температуру заготовок удерживают ниже температуры рекристаллизации. Повторяют аналогичный процесс с последующими заготовками. Таким образом, металл, проходя место первого стыка между контейнерами, сваривается, его зерна измельчаются вследствие интенсивного кручения под давлением иковки. Далее металл заготовки, проходя вторую плоскость стыка, еще раз подвергается интенсивному кручению под давлением.

Высокочастотная ковка гидромолотом или каким-либо другим устройством выполняет три задачи. Во-первых, благодаря соразмерным по энергии ударам гидромолота заготовки постепенно продвигаются вниз, проходя две плоскости кручения. Во-вторых, во время обработки малопластичных металлов кручением под давлением в материале могут образовываться микроразрывы и микропоры. Благодаря непрерывной ковке с подходящей энергией и частотой ударов, которую производят одновременно с кручением и с приложением статического давления, свежесформованные внутренние микроразрывы и микропоры надежно «залечиваются». В-третьих, как указано выше, ковка в условиях высокого давления и кручения способствует сварке заготовок между собой. В экспериментальной установке образцы из меди получены и исследованы. Результаты исследования образцов описаны в работах Иванищенко Ю.В. с соавт. [16, 17].

Итак, из полученных длинномерных заготовок путем последующей обработки можно изготовить проволоку и профили с высокими значениями прочности и пластичности для деталей машиностроения и строительства высотных зданий и ответственных сооружений.

В заключение хочу выразить искреннюю благодарность доктору технических наук В.Т. Федорову (fedorovsteer@gmail.com) за консультацию и обсуждение статьи.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГИВАРГИЗОВ Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М.: Наука. 1977. 303 с.
2. КОРЗНИКОВА Г.Ф., ЧЕППЕ Т., КОРЗНИКОВА Е.А. Структура и свойства аморфных сплавов на основе Ni, консолидированных кручением под давлением / VI Международная конференция «Фазовые превращения и прочность кристаллов». Черноголовка. 2010. С. 152.
3. Мост Акаси-Кайке, Япония. Most Akasi-Kaike, Yaponiya. <https://bridge-builder.ru/mosty-v-mire/most-akasi-kaike-v-yaponii.html> (Дата обращения 12.11.2020).
4. Патент РФ 2705835. Способ производства высокопрочной проволоки из стали и линия для его осуществления. Шаврин О.И. 2019.
5. СЕГАЛ В. М., РЕЗНИКОВ В. И., КОПЫЛОВ В. И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника. 1994. 232 с.
6. BRIDGMAN P.W. Study of large plastic deformations and fracture. Moscow. Ed. by Foreign literature Press. 1955. 444 p.
7. Europäische Patentschrift EP 2821 156 A1. Vorrichtung und Verfahren zur Umformung von Bauteilen aus Metallwerkstoffen. Fedorov Victor, Ivanisenko Julia, Baretzky Brigitte, Hahn Horst. Priorität: 04.07.2013.
8. FROMMEYER G., RABLBAUER R. High temperature materials based on the intermetallic compound NiAl reinforced by refractory metals for advanced energy conversion technologies // Steel Research International. 2008. № 7.
9. KARLHEINZ ROIK, GERT ALBRECHT, ULRICH WEYER. SCHRÄGSEILBRÜCKEN WILHELM. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin (Germany). 1986. P. 40.
10. LANGDON T.G., FURUKAWA M., NEMOTO M., HORITA Z. Using equal channel angular pressing to refining grain size // IOM. 2000. V. 52. N 4. P. 30–33.
11. MATSUBARA K., MIYAHARA Y., HORITA Z. Langdon T.G. Developing superplasticity in a magnesium alloy through a combination of extrusion and ECAP // Acta Mat. 2003. V. 51. P. 3073–3084.
12. MEYERS M.A., MISHRA A., BENSON D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // Progr. Mat. Sci. 2006. V. 51. P. 427–556.
13. Patent DE 10 2011 052 947.0. Physikalisch-mechanische Methode zur Herstellung hochreiner Pulver. V.T. Fedorov, Yu. Ivanisenko, H. Hahn.
14. SEGAL V.M. Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation. Materials Science and Engineering: A 271 (1–2): 1999. P. 322–333.
15. FEDOROV V.T., HAHN H., IVANISENKO YU. Processing of fine particles of soft metals by extreme extrusion // Advanced Engineering Materials. 2012, 14, N 5. P. 296–298.
16. IVANISENKO YU., KULAGIN R., FEDOROV V., MAZILKIN A., SCHERER T., BARETZKY B., HAHN H. Continuous high pressure torsion as a new severe plastic deformation process. Materials Science & Engineering A. 2016. A 664 247.
17. IVANISENKO YU., FEDOROV V.T., BARETZKY B., HAHN H. New processing methods of severe plastic deformation // NanoSPD6 in Metz, France. The 6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, 2014 June 30 – July 4.

Кокоев Мухамед Нургалиевич,
д.т.н., профессор кафедры организации строительного
производства Кабардино-Балкарского государственного
университета им. Х.М. Бербекова, советник РААСН

☎ 360004, РФ, КБР, Нальчик, ул. Чернышевского, 173).
360004, RF, KBR, Nalchik, Chernyshevsky St., 173
тел.: +7 (8662)40-45-40, e-mail: kbagrostroy@yandex.ru