

$3,0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ . Распределение дислокаций в ламелях феррита носит планарный характер, плотность дислокаций в них сопоставима с показателями для аустенита.

Таким образом, после аддитивного роста стальной заготовки методом проволоочной электронно-лучевой наплавки в ней формируется существенно неоднородная микроструктура, которая зависит от термической истории каждой части заготовки и ее элементного состава.

*Автор работы выражает благодарность Е.Г. Астафуровой, В.А. Москвиной, Г.Г. Майер и С.В. Фортуна за помощь в проведении исследований. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» (ИФПМ СО РАН).*

#### **Список литературы**

1. Meric de Bellefon G., van Duysen J. C., Sridharan K. Composition-Dependence of Stacking Fault Energy in Austenitic Stainless Steels through Linear Regression with Random Intercepts // Journal of Nuclear Materials. 2017. Vol. 492. P. 227–230.

### **МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДА (ПИ)**

*С.В.ПАНИН<sup>1,2</sup>, Д.О.ЦЗЯНКУНЬ<sup>2</sup>, Л.А.КОРНИЕНКО<sup>1</sup>, В.О.АЛЕКСЕНКО<sup>1,2</sup>, Л.Р.ИВАНОВА<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Полиимид (ПИ) – высокотехнологичный высокотемпературный полимерный материал, который благодаря своим ценным свойствам применяется в машиностроении, автомобильной, горнодобывающей, химической отраслях, а также в медицине (например, для изготовления эндопротезов, межпозвонковых дисков и т. д). ПИ обладает по сравнению с другими полимерами высокими характеристиками твердости, жесткости, износостойкости и прочности, показывает повышенную стабильность размеров и ударопрочность даже при длительных высокотемпературных нагрузках. Он предназначен для работы в условиях повышенного давления, химически агрессивных сред и имеет достойную стойкость к гидролизу, а также хорошие электроизоляционные свойства [1,2]. Быстрое развитие современной науки и техники диктует высокие требования к материалам, в частности, к износостойкости антифрикционных материалов в различных условиях эксплуатации. В этом случае основной задачей применения композитов на основе полимеров является снижение коэффициента трения и износа при сохранении достаточно высоких физико-механических показателей композиции.

Снижение износа полимера за счет твердосмазочного наполнителя один из путей расширения номенклатуры антифрикционных материалов для трибоузлов в машиностроении и медицине. Например, политетрафторэтилен, дисульфид молибдена, графит и др. [3,4].

В работе использовали порошок ПИ (SolverPI-Powder 1600) со средним размером частиц 16 мкм. В качестве наполнителей использовали частицы политетрафторэтилена (ПТФЭ) ( $\varnothing$  6-20 мкм) в объеме 10 - 20 вес. % и дисульфида молибдена  $\text{MoS}_2$  ( $\varnothing$  1÷7 мкм) в объеме 5-20 вес. %. Образцы для испытаний получали методом горячего прессования при давлении 15 МПа и температуре 370 °С. Механические характеристики определяли при разрывных испытаниях на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов в форме двойной лопатки (ГОСТ 11262-80). Испытание образцов на изнашивание в режиме сухого трения проводили по схеме «шар-по-диск» при нагрузке  $P=5$  Н и скорости скольжения  $V=0,3$  м/с на трибометре CSEM CH-2000 в соответствии с ASTM G99. При трибоиспытаниях использованы два типа шарика-контртела: из стали

ШХ15 и керамический  $Al_2O_3$ . Диаметр шарика контртела составлял 6 мм. Путь испытания равен 1 км, радиус траектории триботрека – 16 мм. Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержанных в жидком азоте.

Показано, что введение твердых смазочных частиц приводит к снижению механических свойств композита. При содержании ПТФЭ в количестве 10 вес. %, механические свойства композита снижаются в 2 раза по сравнению с ненаполненным полиимидом. Добавление  $MoS_2$  до 20 вес. % позволяет повысить модуль упругости композита при сохранении деформационно прочностных характеристик. Увеличение содержания ПТФЭ до 15 – 20 вес. % приводит к снижению прочностных свойств более, чем в 5 раз. Многокомпонентные композиции на основе ПИ с твердосмазочными наполнителями (ПТФЭ и  $MoS_2$ ) не способны обеспечить необходимую износостойкость при одновременном сохранении прочностных свойств матрицы, что связано с особенностями формирующейся надмолекулярной структуры матрицы.

Показано, что эффективным твердосмазочным наполнителем для полиимида является политетрафторэтилен, повышающий износостойкость матрицы до 100 раз за счет формирования пленки переноса на контртеле. Дисульфид молибдена выступает абразивом и в количестве 5 вес.% не обеспечивает сохранение механических характеристик на уровне исходной матрицы.

Двухкомпонентный композит ПИ+15вес.% ПТФЭ может быть рекомендован в качестве антифрикционного для узлов трения в металло- и керамо-полимерных сопряжениях.

#### Список литературы

1. Geraldine T, Thomas G. Tribological characteristics of polyimide composites in hydrogen environment. Tribol Int 2015; 92: 162–71.
2. Ragosta G, Musto P. Polyimide/silica hybrids via the sol-gel route: high performance materials for the new technological challenges. Express Polym Lett 2009; 3: 413–28.
3. M Conte, B Pinedo, A Igartua. Role of crystallinity on wear behavior of PTFE composites. Wear, 2013, 307: 81–86.
4. Chen ZY, Yan HX, Liu TY, Niu S. Nanosheets of  $MoS_2$  and reduced graphene oxide as hybrid fillers improved the mechanical and tribological properties of bismaleimide composites. Tribol Int 2016; 125: 47–54.

#### ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНВАРНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СПЕКАНИЕМ ПОРОШКОВ

*ЦЗЯЦЗЮНЬ ЧЭНЬ<sup>1</sup>, С.Н. КУЛЬКОВ<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [chenj27@outlook.com](mailto:chenj27@outlook.com)

Инварные сплавы Fe – 30–40 wt% Ni являются прецизионными материалами и представляют значительный практический интерес. В этой области содержания никеля они обладают низким коэффициентом теплового расширения (КТР), что указывает на перспективность применения в качестве элементов точных инструментов и приборов.

Как известно, на КТР реальных материалов влияет ряд факторов, вызванных дефектами структуры, например пористость, границы зерен, дислокации и др. [1], поэтому КТР инварных сплавов может изменяться при изменении способов получения. Таким образом исследование теплового расширения подобных сплавов различными методами, в