

УДК 621.762

## МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВОГО ПОЛОСОВОГО МАТЕРИАЛА

**С. В. ШИШКОВ, Ю. Л. БОБАРИКИН, А. М. УРБАНОВИЧ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Большинство современных машин и механизмов имеют подвижные сочленения, обеспечивающие возможность выполнения ими рабочих функций, связанных с передвижением, подъемом грузов, обработкой материалов, токосяемом, скользящими уплотнениями и т. п.

В настоящее время существует множество узлов трения, в которых применяются антифрикционные материалы: цилиндрические и шариковые подшипники, подпятники, вкладыши, направляющие, скользящие токосяемники, торцевые и боковые уплотнения, шарнирные устройства и др. Не менее разнообразны и условия их работы: со смазкой, при граничном трении, трении без смазки, в вакууме, при повышенных температурах, высоких скоростях, больших нагрузках, в воде и агрессивных средах, углекислом газе, инертных газах и пр. Узлы трения могут работать как при одностороннем, так и при возвратно-поступательном движении.

Перечисленные обстоятельства не позволяют создать универсальный антифрикционный материал, способный работать в узлах трения различного назначения. Отсюда возникает необходимость разработки множества разных материалов трения для конкретных заданных условий работы. Ранее широко применявшаяся технология изготовления антифрикционных материалов методом литья в ряде случаев бессильна создать материалы, отвечающие требованиям особых условий работы. Частично возможности более гибкого удовлетворения требований оснащения узлов трения материалами, обладающими оптимальными свойствами, расширяет применение материалов на основе полимеров.

Радикальное решение проблемы было найдено при использовании методов порошковой металлургии, когда из исходного сырья в виде смесей порошков металлов и неметаллов прессуются заготовки подшипников, подвергающиеся спеканию в защитной газовой среде при температурах ниже температуры плавления основного компонента [1]. Эти методы позволяют получить композиционные материалы трения с практически неограниченными вариациями состава и пористости. Поры, заполненные жидкими или твердыми смазочными материалами, играют роль резервуаров смазки, обеспечивающих эффект самосмазывания.

Одним из таких материалов является металлофторопластовый материал, который может выполняться в виде ленты или полосы. Металлофторопластовая полоса представляет собой композиционный материал, состоящий из нескольких слоев (рис. 1).

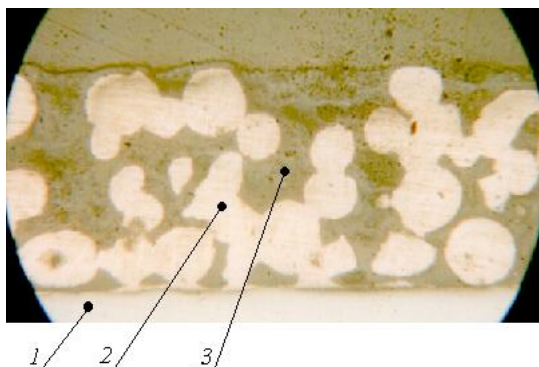


Рис. 1. Микроструктура металлофторопластовой полосы:  
1 – стальная полоса; 2 – частицы бронзы; 3 – поры, заполненные фторопластом

Металлофторопластовый материал применяется для изготовления подшипников скольжения (рис. 2).

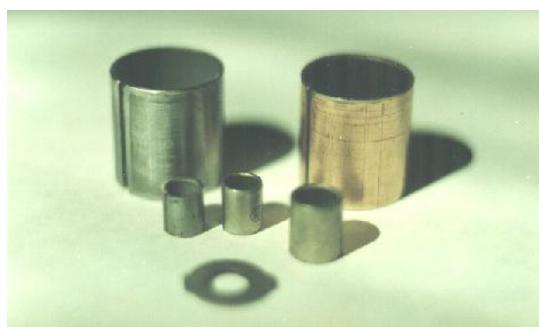


Рис. 2. Подшипники скольжения

Технологический процесс изготовления металлофторопластовой полосы состоит из следующих основных этапов [1]:

1. Подготовка стальной полосы.
2. Подготовка порошковой шихты.
3. Нанесение порошковой шихты на стальную полосу методом совместной прокатки порошковой шихты и стальной основы.
4. Спекание бронзового порошка.
5. Пропитка пористого бронзового слоя пастой фторопласта методом совместной прокатки пасты и пористого бронзового слоя.
6. Окончательная обработка полосы – калибровка прокаткой и «закалка» фторопласта (рис. 3).

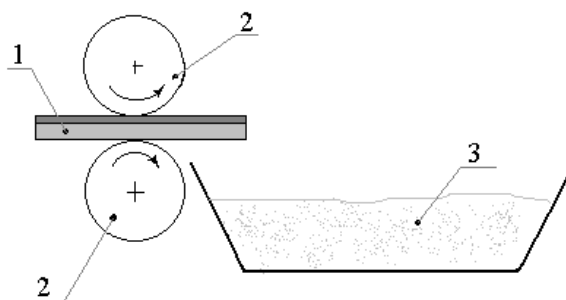


Рис. 3. Схема калибровки и закалки:  
1 – металлофторопластовая полоса; 2 – прокатные валки; 3 – ванна с водой

Неравномерность послойной деформации определяет значения толщин слоев при производстве слоистого композита [5] и металлофторопластовой полосы в частности.

Целью исследования является получение аналитической зависимости послойной деформации от технологических параметров, с помощью которой будет возможно устанавливать такие параметры процесса изготовления, которые будут обеспечивать требуемые толщины слоев материала.

### Основная часть

Металлофторопластовая полоса состоит из верхнего тонкого фторопластового слоя, контактирующего с контртелом трения, среднего бронзо-фторопластового слоя и несущего стального слоя. Часто к материалу предъявляются требования по точным значениям толщин слоев. Но при калибровке металлофторопластовой полосы прокаткой толщины слоев изменяются непропорционально вследствие разности в механических свойствах слоев. Поэтому возникает необходимость прогнозирования значений толщин слоев металлофторопластового материала на стадии калибровки полосы.

Процессы обработки металлов давлением сопровождаются большей или меньшей неравномерностью деформации. При совместном пластическом деформировании металлов возникает еще и послойная неравномерность деформации.

Неравномерность послойной деформации является одной из самых важных и сложных задач теории совместного пластического деформирования. В общем случае неравномерность послойной деформации при совместном пластическом деформировании различных металлов зависит от ряда факторов [2]:

- соотношения сопротивлений деформации материалов в состоянии совместной обработки;
- соотношения толщин слоев;
- величины и направления сил межслойного трения;
- величины и направления сил внешнего контактного (с поверхностью инструмента) трения;
- взаимного расположения слоев в многослойной заготовке;
- параметров пластической зоны.

### Результаты исследования

При создании аналитической зависимости исследовался процесс калибровки полосы, т. е. когда прокатывается полоса, состоящая из трех разнородных слоев: стальная основа, бронзофторопластовый слой и фторопластовый слой.

Так как послойная деформация зависит от соотношения сопротивлений деформации материалов, то возникла необходимость получения законов упрочнения для каждого слоя.

Для построения кривых упрочнения были проведены испытания на сжатие согласно ГОСТ 25.503–80. По полученной диаграмме усилия были построены кривые упрочнения фторопластового и бронзофторопластового слоев (рис. 4 и 5).

Аппроксимация экспериментальных кривых (рис. 4 и 5) позволила получить полиномы 4-го порядка (1), (2):

$$\sigma_{S_{\text{бр}}}(\varepsilon) = 19,058 \cdot \varepsilon - 929,005 \cdot \varepsilon^2 + 9080,915 \cdot \varepsilon^3 - 22948,539 \cdot \varepsilon^4; \quad (1)$$

$$\sigma_{S_{\text{ф}}}(\varepsilon) = 0,002 - 211,184 \cdot \varepsilon - 4398,205 \cdot \varepsilon^2 - 18514,858 \cdot \varepsilon^3 + 25713,085 \cdot \varepsilon^4, \quad (2)$$

где  $\sigma_{S_{\text{бр}}}$  – сопротивление деформации бронзового слоя, МПа;  $\sigma_{S_{\text{ф}}}$  – сопротивление деформации фторопластового слоя, МПа;  $\varepsilon$  – относительная деформация, %.

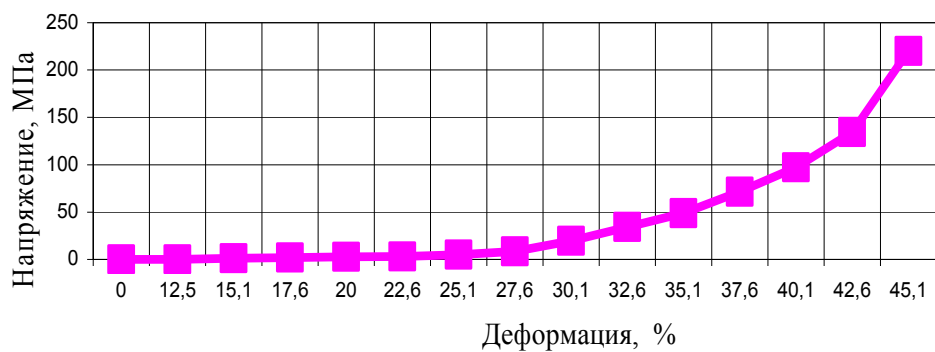


Рис. 4. Кривая упрочнения бронзофторопластового слоя

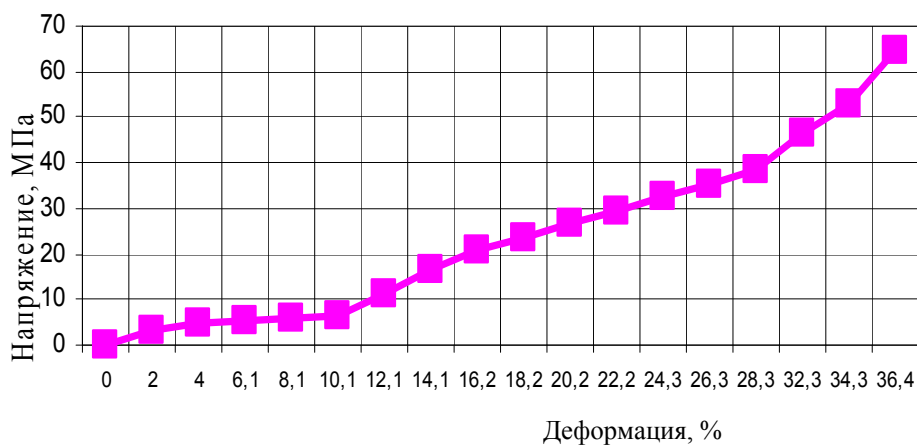


Рис. 5. Кривая упрочнения фторопластового слоя

Для определения связи параметров процесса калибровки прокаткой с послойной деформацией рассмотрим очаг деформации (рис. 6).

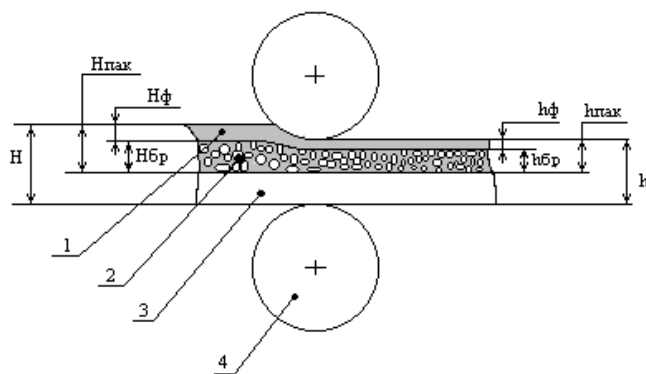


Рис. 6. Схема очага деформации при прокатке:  
 1 – фторопластовый слой; 2 – бронзофторопластовый слой;  
 3 – стальная основа; 4 – прокатные валки

Величина обжатия одновременно трех слоев при прокатке относительно невелика – не более 10 %. В большинстве случаев требуется, чтобы деформация стальной основы отсутствовала, так как основную функциональную нагрузку несут бронзофторопластовый и фторопластовый слои. Тогда требуется получить уравнения, позволяющие устанавливать режим деформации, формирующий требуемые толщины бронзофторопластового и фторопластового слоев.

Основные зависимости для определения послойной деформации:

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{H_{\phi} - h_{\phi}}{H_{\phi}} \text{ – относительная деформация фторопластового слоя;}$$

$$\varepsilon_{\text{бр}} = \frac{H_{\text{бр}} - h_{\text{бр}}}{H_{\text{бр}}} \text{ – относительная деформация бронзофторопластового слоя;}$$

$$\varepsilon_{\text{пак}} = \frac{H_{\text{пак}} - h_{\text{пак}}}{H_{\text{пак}}} \text{ – относительная деформация пакета, состоящего из слоя стальной}$$

полосы, бронзофторопластового слоя и слоя фторопласта.

Согласно геометрии очага деформации, относительная деформация пакета определяется следующим выражением:

$$\varepsilon_{\text{пак}} = \frac{H_{\phi} + H_{\text{бр}} - h_{\phi} - h_{\text{бр}}}{H_{\phi} + H_{\text{бр}}} = \frac{H_{\phi} + H_{\text{бр}}}{H_{\phi} + H_{\text{бр}}} - \frac{h_{\phi} + h_{\text{бр}}}{H_{\phi} + H_{\text{бр}}} = 1 - \frac{h_{\phi} + h_{\text{бр}}}{H_{\phi} + H_{\text{бр}}}. \quad (3)$$

С другой стороны, так как деформация стальной основы равна нулю, можно записать:

$$h_{\text{пак}} = \Delta - H_{\text{ст}},$$

где  $\Delta$  – зазор между валками.

Тогда деформация пакета, выраженная через зазор между валками, равна:

$$\varepsilon_{\text{пак}} = \frac{H_{\text{пак}} - \Delta + H_{\text{ст}}}{H_{\text{пак}}}. \quad (4)$$

Приравняв правые части (3) и (4), получим уравнение, связывающее основные параметры послойной деформации:

$$\frac{H_{\text{пак}} - \Delta + H_{\text{ст}}}{H_{\text{пак}}} = 1 - \frac{h_{\phi} + h_{\text{бр}}}{H_{\phi} + H_{\text{бр}}}. \quad (5)$$

Предполагается, что уравнение, связывающее послойную деформацию со свойствами материала, имеет вид [4]:

$$\frac{\varepsilon_{\phi}}{\varepsilon_{\text{бр}}} = \frac{\sigma_{S_{\text{бр}}}(\varepsilon)}{\sigma_{S_{\phi}}(\varepsilon)}. \quad (6)$$

Таким образом, система уравнений (5) и (6) представляет собой аналитическую зависимость, связывающую между собой основные параметры послойной деформации, свойства деформируемого материала, а также технологические параметры процесса деформирования. Для того чтобы определить соотношение толщин слоев после прокатки, необходимо решить систему уравнений (5) и (6) относительно  $h_{\phi}$  и  $h_{\text{бр}}$ .

Для определения степени достоверности полученной аналитической зависимости был проведен ряд опытов по прокатке металлофторопластовой полосы с различными степенями обжатия. Исходные толщины фторопластового и бронзофторопластового слоев составляли  $h_{\text{ф}} = 0,1$  мм и  $h_{\text{бр}} = 0,35$  мм, соответственно, толщина стальной основы  $h_{\text{ст}} = 0,8$  мм. Используя полученную аналитическую зависимость, для опытных условий были рассчитаны теоретические значения толщин слоев от степени обжатия полосы (рис. 7 и 8).

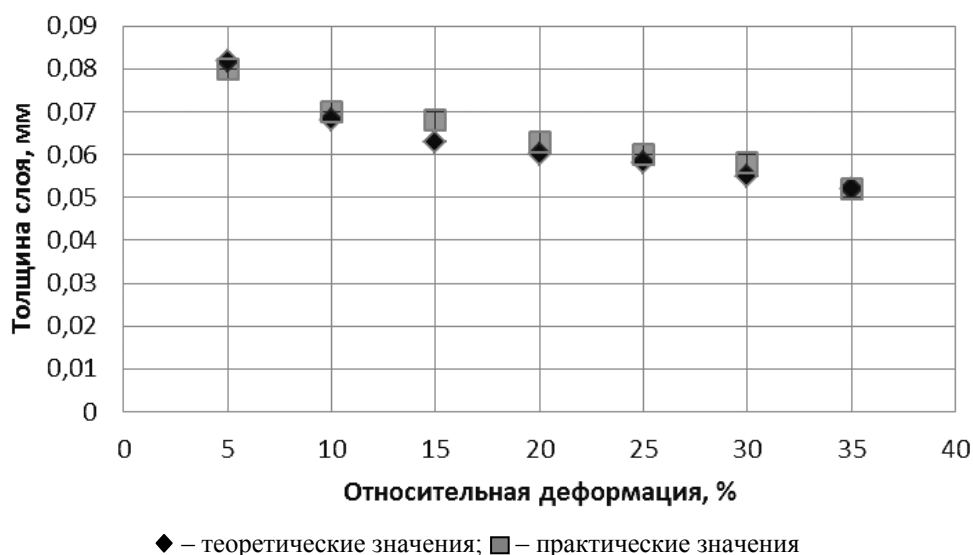


Рис. 7. Зависимость конечной толщины фторопластового слоя от степени обжатия

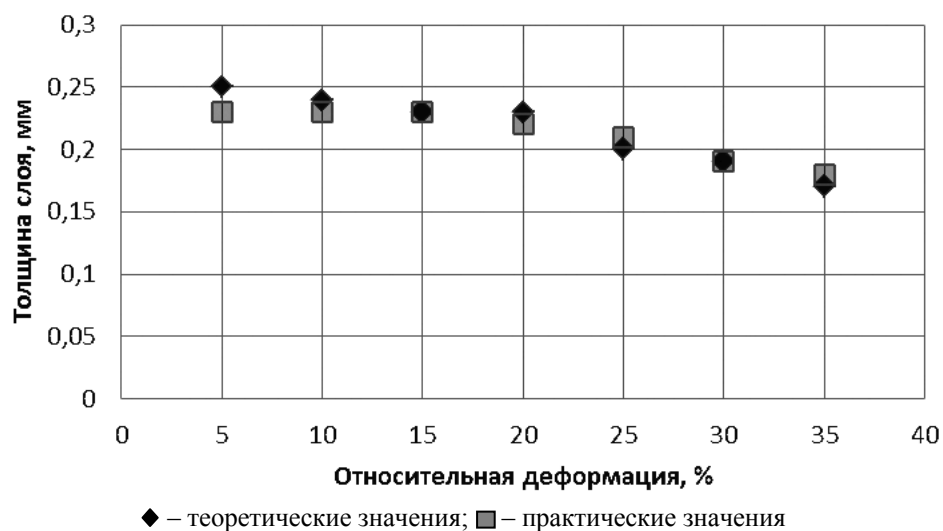


Рис. 8. Зависимость конечной толщины бронзофторопластового слоя от степени обжатия

Сравнивая эти значения с экспериментальными данными (см. рис. 7 и 8), было установлено, что по критерию Фишера модель считается адекватной с доверительной вероятностью 0,95.

### **Заключение**

Таким образом, результатом исследования стало создание аналитической зависимости, связывающей основные параметры послойной деформации и свойства деформируемого материала. Полученная зависимость позволяет устанавливать такие параметры процесса калибровки прокаткой металлофторопластовой полосы, которые будут обеспечивать требуемые значения толщины слоев материала.

Полученная аналитическая зависимость может применяться в инженерных расчетах значений толщин слоев при производстве слоистых композитов, содержащих исследованные материалы.

### **Литература**

1. Бобарикин, Ю. Л. Способ изготовления полосового антифрикционного металлофторопластового материала / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Шишков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 3. – С. 3–9.
2. Семенов, А. П. Металлофторопластовые подшипники / А. П. Семенов, Ю. Э. Савинский. – М. : Машиностроение, 1976. – 192 с.
3. Король, В. К. Основы технологии производства многослойных металлов / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. – М. : Metallургия, 1970. – 236 с.
4. Северденко, В. П. Основы теории прокатки / В. П. Северденко. – Минск : Наука и техника, 1969. – 234 с.
5. Производство металлических слоистых композиционных материалов : монография / А. Г. Кобелев [и др.]. – М. : Интермет инжиниринг, 2002. – 495 с. : ил.

*Получено 21.10.2016 г.*