

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГОСВНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.

S. V. MAKEEV

HOPPER CAR FOR MINERAL FERTILIZERS MODEL 19-923 STRENGTH ANALYSIS

The hopper fertilizer car body, Model 19-923, strength design procedure has been developed. The computational results of basic body constructs on normative characteristic load are presented.

Получено 15.12.2008

**ISBN 978-985-468-565-6. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 3. Гомель, 2009**

УДК 678.742

А. К. НОВИКОВ

*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси, Гомель*

ПРОЧНОСТЬ ПЛАСТМАССОВЫХ ОТЛИВОК, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРОТОЧНОГО ЛИТЬЯ

Приведены теоретическая оценка и экспериментальные результаты исследования прочности отливок из пластмасс, полученных методом проточного литья.

Введение. Методом литья под давлением получают примерно третью часть пластмассовой продукции. В исходном (базовом) варианте процесс включает заполнение под давлением оформляющей изделие полости литьевой формы пластмассовым материалом, отверждение отливки и извлечение изделия. Аппаратурное оформление базового варианта содержит основное оборудование – термопластавтомат, технологическую оснастку – литьевую форму; периферийное оборудование – сушилки, загрузчики, транспортные системы, робототехнические устройства, систему охлаждения; систему управления. Изменяющееся многообразие объектов техники, где применяются пластмассы, форм деталей и условий их эксплуатации и технических требований к ним, развитие смежных областей науки и техники, бурный прогресс информационно-вычислительной техники, разработка и исследование полимерных материалов и процессов их переработки приводят к разработке специальных методов [1–5]. В ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси была разработана позволяющая управлять процессами формо- и структурообразования схема литья под давлением пластмасс с течением расплава полимерного материала через оформляющую полость лить-

евои формы (проточное литье под давлением) и исследованы различные аспекты этого метода, некоторые из которых приведены далее.

1 Оценка прочности отливок. Отливка имеет многослойную структуру в связи с неравновесностью процесса литья. Для традиционного метода литья под давлением с заполнением оформляющей полости литьевой формы в поперечном сечении литьевых изделий можно выделить три структурные области, которые формируются в трех основных периодах технологического процесса литья под давлением: поверхностная оболочка – образуется в период заполнения формы, средний слой – формируется в течение периода нарастания давления, центральный слой – образуется в течение периода спада давления. Механические свойства литьевых изделий связаны со структурой и относительной площадью указанных областей [6].

Наличие высокотемпературной фазы является отличительной структурной особенностью материала, полученного методом проточного литья, которая обеспечивает значительное повышение его прочности. Поверхностный слой, формирующийся на стадии заполнения оформляющей полости литьевой формы, и центральный слой, формирующийся без протекания материала через оформляющую полость, не содержат высокотемпературной фазы. Приповерхностный слой, сформированный на стадиях заполнения оформляющей полости литьевой формы и протекания под давлением через нее, и средний слой, сформированный на стадии протекания расплава полимерного материала под давлением, содержат высокотемпературную фазу, придают отливке в целом повышенную прочность и могут рассматриваться как самоармированный волокнами композиционный материал, упрочненный ориентированной высокотемпературной фазой.

Наполнители усиливают полимерную матрицу весьма сложным образом. В зависимости от длины волокнистого наполнителя и его прочности, распределения по объему отливки и ориентации, адгезии с полимерной матрицей, взаимного расположения и взаимодействия структурных составляющих прочность может изменяться в широких пределах, что учитывается при расчете как видом функции, так и поправочными коэффициентами [7–9]. Верхняя граница модуля упругости определена в нашем случае по следующей зависимости [8]:

$$E_{11} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) = E_f V_f + E_m V_m; \quad \frac{E_{11}}{E_m} = \frac{E_f V_f}{E_m} + V_m, \quad (1)$$

где E_{11} – модуль упругости материала в направлении ориентации волокон; E_f – модуль упругости волокон в направлении определения прочности; V_f – относительный объем волокон, ориентированных в направлении определения прочности; E_m и V_m – модуль упругости и относительный объем матрицы в направлении ориентации волокон;

Длинные ориентированные волокна обеспечивают значения показателей модуля, соответствующие верхнему пределу [8], нижняя граница модуля упругости определена по зависимости [8]:

$$E_{11} = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + E_f V_m} \text{ или } \frac{E_{11}}{E_m} = \frac{E_f}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}, \quad (2)$$

где обозначения такие же, как в зависимости (1).

Величина модуля упругости находится между верхним и нижним пределами и более точно может быть определена по формуле [10]:

$$\frac{E_{11}}{E_m} = (1 + \xi \eta V_f) / (1 - \eta V_f), \quad (3)$$

где $\eta = (E_f / E_m - 1) / (E_f / E_m + \xi)$, $\xi = 2L / D$, L / D – отношение длины упрочивающего компонента к его диаметру.

Результаты расчета модуля продольной упругости упрочненной отливки приведены на рисунках 1, 2. По формуле (1) определена верхняя граница модуля упругости, распределение которой по толщине отливки имеет экстремальный вид с максимумом на глубине $h = 0,5$ мм (см. рисунок 1). По зависимости (2) определена нижняя граница модуля упругости, распределение которой по толщине имеет слабо выраженный максимум (см. рисунок 1). Расчет по зависимости (3) дает результаты, расположенные между верхней и нижней границами. Экспериментально определенное распределение доли упрочняющих элементов высокотемпературной фазы по толщине отливки (см. рисунок 1) и распределение прочности по толщине отливки также имеют максимум в приповерхностном слое [11]. Положение максимумов, полученных расчетным путем совпадает с положением максимумов экспериментальных зависимостей доли упрочняющих элементов высокотемпературной фазы и прочности по толщине отливки.

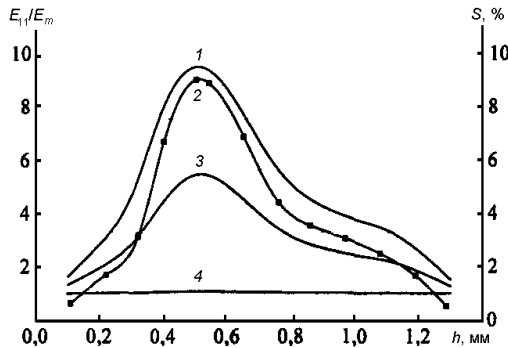


Рисунок 1 – Распределение по толщине h упрочненной отливки относительного модуля упругости E_{11}/E_m и количества S упрочняющей фазы:

1 – верхняя граница модуля упругости; 2 – экспериментальное распределение по толщине h отливки доли S высокотемпературной упрочняющей фазы, полученное методом дифференциальной сканирующей микрокалориметрии; 3 – расчет в рамках композитной модели с учетом относительного модуля упругости и длины упрочняющих волокон; 4 – нижняя граница

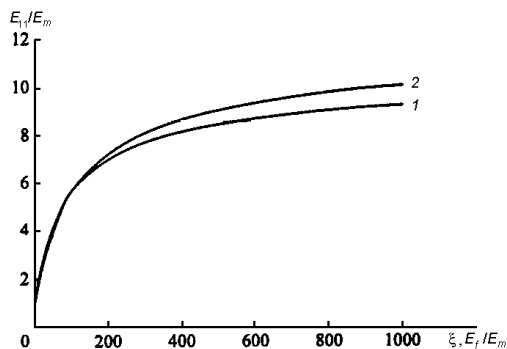


Рисунок 2 – Влияние относительных длины ξ упрочняющих волокон и модуля упругости E_f/E_m волокон на относительный модуль упругости E_1/E_m отливки:

- 1 – влияние относительной длины ξ упрочняющих волокон;
- 2 – влияние относительного модуля упругости волокон E_f/E_m

Выполнена оценка влияния относительных длины и модуля упругости упрочняющих элементов на относительный модуль упругости отливки по формуле (3) (см. рисунок 2). Из представленных данных видно, что увеличение относительных длины и модуля упругости упрочняющих элементов приводит к росту модуля упругости отливки по кривой с насыщением – наиболее интенсивно на начальном участке и по мере дальнейшего увеличения рост модуля упругости отливки замедляется. Однако возрастание относительного модуля упругости упрочняющих элементов оказывает более сильное влияние на упрочнение отливки, чем возрастание относительной длины волокон.

2 Влияние технологии литья под давлением на физико-механические характеристики наполненных полимеров.

Структура и свойства наполненных кристаллизующихся полимеров исследованы в многочисленных работах (например [12–16]). Установлено, что модифицирование полиолефинов наполнителями приводит к изменениям молекулярной, надмолекулярной структур, влияет на ход процессов кристаллизации и релаксации, физико-механические, теплофизические и другие свойства полимера. Указанные изменения зависят также от условий совмещения компонентов и переработки композиции, влияние условий литья под давлением на свойства наполненных полиолефинов исследовано недостаточно.

В качестве матричного материала использовали полиэтилен низкого давления (ПЭНД) ГОСТ 16338-85. Наполнителями служили дисперсные неорганические и органические добавки, а также древесная мука (0,01–1,5 мм) и углеродный волокнистый материал УРАЛ Т-15Р-А ГОСТ 28005–88 (6х180 мкм).

Показатели физико-механических характеристик для материалов, содержащих оптимальное по σ_{pp} количество изометричного дисперсного модификатора в области малых добавок приведены в таблице 1. Из нее видно, что при

литье с течением характерно, в основном, снижение прочности модифицированного материала (но введение оксида цинка повышает прочность) в отличие от литья с заполнением, для которого наблюдается обратная картина. Введение древесной муки повышает $E_{изг}^3$, снижает значения $E_{изг}^T$, σ_{pp}^T , K , ϵ_{pp} , но значение $E_{изг}^T$ растет при значительных концентрациях (рисунок 3, а, таблица 1). Для материала, наполненного углеродным волокном, $E_{изг}$ изменяется экстремальным образом, оставаясь выше уровня прочности матрицы, а σ_{pp}^T незначительно снижается, возрастая при значительных концентрациях до исходной прочности (рисунок 3, б, таблица 1).

Таблица 1 – Показатели физико-механических характеристик системы ПЭНД 209-01 + дисперсная добавка

Наименование добавки	Литье с заполнением			Литье с течением		
	мас. %	σ_{pp}^3 , МПа	ϵ_{pp}^3 , %	мас. %	σ_{pp}^T , МПа	ϵ_{pp}^T , %
—	0	49	40	0	180	28
Оксид цинка	0,5	51	28	0,5	189	27
Оксид алюминия	2	54	22	1	179	26
Оксид магния	1	51	19	0,5	166	27
Оксид железа	1	55	25	1	151	30
Оксид меди	1	63	23	1	137	20
Феррит стронция	0,2	81	21	0,2	150	23
Сера	0,1	66	23	1	118	16
Оксигидрохинон	0,5	75	24	0,1	138	23
NN-диаминодифенилметандималенинимид	0,1	73	20	0,5	143	9
NN-м-фенилендималенинимид	1	72	25	0,5	103	14
Перекись дикумила	0,5	84	20	0,5	128	24

Примечание – σ_{pp} – разрушающее напряжение при растяжении; ϵ_{pp} – относительное удлинение при разрыве. Индексы: т – литье с течением, з – литье с заполнением.

Наполнитель влияет на процесс формирования и поведение сформированного композиционного полимерного материала. При литье с заполнением упрочнение осуществляется за счет благоприятных изменений в структуре, не связанных с объемной ориентацией. Однако наполнитель может усиливать дефектность, размер и форму частиц, их агрегатов, что также влияет на прочность композита [12–14]. При литье под давлением с течением через оформляющую полость в твердеющем материале усиливаются ориентационные процессы, наряду с которыми протекают процессы релаксации и фиксирования при затвердевании. Растяжение ориентированного упрочненного полимера вызывает, вследствие более высокого напряжения, рост растягивающих локальных напряжений вблизи дефектов, что снижает прочность [17] и отрица-

тельно сказывается на физико-механических характеристиках и коэффициентах упрочнения при литье с течением материалов, содержащих изометричные добавки (см. таблицу 1), древесную муку (см. рисунок 3, а, таблицу 2), углеродное волокно (см. рисунок 3, таблицу 2). Анизометричные наполнители имеют повышенную способность к образованию собственной структуры в среде полимера [13], которая может возрастать при литье с течением, что способствует увеличению ϵ_{pp} , (см. таблицу 2). Наполнитель в процессе литья с течением может также, усиливать образование ориентированных структур матрицы, что выражается в экстремальной зависимости прочности и коэффициента упрочнения K_1 в области малых деформаций при введении мелкодисперсного углеродного волокна (см. рисунок 3, б, таблицу 2).

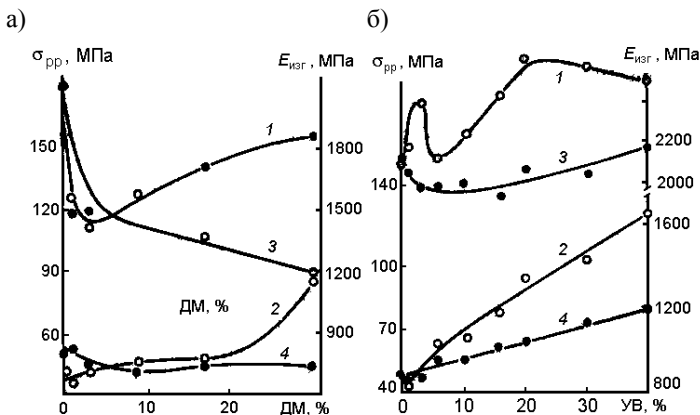


Рисунок 3 – Зависимость физико-механических характеристик от состава систем ПЭНД 209-01 + древесная мука (а) и ПЭНД 210-01 + углеродное волокно (б): 1, 2 – модуль упругости при изгибе ($E_{изг}$); 3, 4 – разрушающее напряжение при растяжении (σ_{pp}); 1, 3 – литье с течением; 2, 4 – литье с заполнением

Таблица 2 – Зависимость относительного удлинения при разрыве и коэффициентов упрочнения системы ПЭНД + наполнитель от состава композиции

Параметр	ПЭНД 209-01+ древесная мука (ДМ), мас. %						ПЭНД 210-01+ углеродное волокно (УВ), мас. %								
	0	1	3	9	17	29	0	0,8	3	5,5	10	15,6	20	30	40
K_1	3,0	2,2	2,1	2,0	2,2	1,6	2,6	2,7	2,8	2,1	2,1	2,1	2,0	1,8	1,5
K_2	3,6	2,4	2,5	3,1	2,4	2,0	3,2	3,2	3,0	2,5	2,6	2,2	2,4	2,0	2,0
ϵ_{pp}^3	40	19	26	20	15	11	40	27	27	23	22	18	18	18	17
ϵ_{pp}^T	28	25	22	25	19	15	29	26	22	25	25	19	22	19	17

Примечание – K_1, K_2 – коэффициенты упрочнения; $K_1 = E_{изг}^T / E_{изг}^3$, $K_2 = \sigma_{pp}^T / \sigma_{pp}^3$.

Заключение. Разнообразные методы литья пластмасс под давлением имеют свои особенности, определяющие процессы формо- и структурообразования отливки и ее эксплуатационные свойства, которые описаны для процесса проточного литья.

Расчетные данные распределения модуля упругости по толщине отливки имеют максимум в приповерхностном слое и соответствуют экспериментальным данным распределения упрочняющей фазы и прочности по толщине отливки. Увеличение относительной длины и модуля упругости упрочняющих элементов приводит к повышению модуля упругости отливки по кривой с насыщением. Полученные расчетные результаты необходимы для прогнозирования структуры и прочности отливок, изготовленных методом проточного литья.

При литье с течением для исследованных наполненных материалов характерно снижение прочности в области больших деформаций при растяжении, но показана возможность повышения прочности как в области малых деформаций при изгибе, так и в области больших деформаций при растяжении. Материалы имеют по сравнению с полученными при литье с заполнением повышенную прочность, позволяют эффективно использовать отходы древесины, расширять диапазон свойств и возможности применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Освальд, Т. А.** Литье пластмасс под давлением / Т. А. Освальд, Л. Ш. Тунг, П. Дж. Грэмман. – СПб. : Профессия, 2006. – 712 с.

2 **Новиков, А. К.** Влияние технологии литья под давлением на физико-механические характеристики смесей термопластов / А. К. Новиков // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1991. – № 3. – С. 39–42.

3 **Новиков, А. К.** Влияние технологии литья под давлением на физико-механические характеристики наполненного полиэтилена / А. К. Новиков // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1992. – № 2. – С. 65–68.

4 **Новиков, А. К.** Расчет процессов ориентации структурных элементов полимеров при литье под давлением с течением расплава через оформляющую полость / А. К. Новиков, Ю. М. Плескачевский // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2000. – № 1. – С. 5–7.

5 **Новиков, А. К.** Оценка прочности отливок, полученных методом литья под давлением с течением расплава полимерного материала через оформляющую полость литьевой формы / А. К. Новиков, Ю. М. Плескачевский // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 4. – С. 47–49.

6 **Калинчев, Э. Л.** Свойства и переработка термопластов / Э. Л. Калинчев, М. Б. Саковцева. – Л. : Химия, 1983. – 288 с.

7 **Нильсен, Л.** Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен. – М. : Химия, 1978. – 310 с.

8 **Мэнсон, Дж.** Полимерные смеси и композиты / Дж. Мэнсон, Л. Сперлинг. – М. : Химия, 1979. – 440 с.

9 Композиционные материалы / под ред. Д. М Карпиноса. – Киев : Наукова думка, 1985. – 592 с.

10 Композиционные материалы. Т. 2. Механика композиционных материалов / ред. Дж. Сендецки ; пер. с англ. – М. : Мир, – 1978. – 564 с.

11 Плескачевский, Ю. М. Влияние технологических и масштабных факторов на физико-механические характеристики литых изделий из полиэтилена / Ю. М. Плескачевский, А. К. Новиков // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1992. – № 1. – С. 26–29.

12 Липатов, Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров / Ю. С. Липатов. – М. : Химия, 1977. – 304 с.

13 Соломко, В. П. Наполненные кристаллизующиеся полимеры / В. П. Соломко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 264 с.

14 Принципы создания композиционных полимерных материалов / А. А. Берлин [и др.]. – М. : Химия, 1990. – 240 с.

15 Бозвелиев, Л. Г. Свойства полиэтилена низкого давления, наполненного дровесной мукой / Л. Г. Бозвелиев, И. Д. Денчев, Н. К. Атанасова // Пластические массы. – 1979. – № 11. – С. 7–8.

16 Любчева, М. Физико-химическая механика / М. Любчева, С. Илиев, Л. Любчев. – НРБ, София. – 1987. – № 15. – С. 69–76.

17 Бартнев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартнев. – М. : Химия, 1984. – 280 с.

A. K. NOVIKOV

STRENGTH OF PLASTIC MOLDINGS OBTAINED BY RUNNING CASTING METHOD

The theoretical estimation and experimental results for strength of plastic moldings obtained by running casting method research have been presented.

Получено 26.11.2008

**ISBN 978-985-468-565-6. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 3. Гомель, 2009**

UDC 621.77.06

A. PLCHOVÁ

VŠB – Technical University of Ostrava

THE MATHEMATICAL MODEL FOR CONTROLLING THE COILING MACHINE FOR METAL STRIPS

The work is a contribution to solving the problems of the process of coiling the metal strip. The whole process of coiling on the model of the coiling machine is divided into five subsequent time periods. Experimental works are included in all the periods and are described by created mathematical models that were verified by means of experimental measuring. Achieved results of the experimental works prove theoretical assumptions for the creation of mathematical models and document that the faultless adjustment of coiling and feeding rollers is the necessary and most important condition for obtaining a tight coil with the required inner diameter.

The whole model of the coiling machine has 9 basic functions at its disposal that participate in the creation of the coil. Experiments prove that the synchronization of all the functions with the model requires the automatic control of at least some mechanisms.