

# Дефекты деталей из термопластов при литье под давлением: «Следы течения»

Барвинский И.А.<sup>1</sup>, Барвинская И.Е.<sup>1</sup>, Дувидзон В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сайт: [www.barvinsky.ru](http://www.barvinsky.ru), e-mail: [ibarvinsky@yandex.ru](mailto:ibarvinsky@yandex.ru), тел. (495) 5812732

<sup>2</sup> ООО «Инженерная фирма АБ Универсал», сайт [www.abuniversal.ru](http://www.abuniversal.ru), e-mail: [abuniver@niit.ru](mailto:abuniver@niit.ru), тел. (495) 3800515

*V Международнй инструментальный саммит. Москва. 3 июня 2010. Препринт.*

При прогнозировании качества литьевых деталей, анализе причин брака и выборе эффективного метода устранения дефектов необходимо учитывать механизмы их формирования. Однако изучение механизмов появления дефектов деталей при литье термопластов является сложной задачей. Высокие скорости реологических, тепловых, структурных и др. процессов в сочетании с высоким давлением и температурой затрудняют получение достоверной информации непосредственно в ходе литья. При изучении готовых деталей необходимо учитывать, что дефекты, которые формируются при заполнении формы, могут значительно изменяться на стадии уплотнения, а также при усадочных процессах.

Распространенными дефектами, возникающими при литье деталей из термопластов, являются так называемые «следы течения» («flow marks», «flow lines») /1-7/.

Согласно /8/ «следы течения» - «следы на поверхности изделия из-за неравномерности течения пластмассы». В современной научной, технологической и патентной литературе к «следам течения» чаще всего относят одиночные или периодически повторяющиеся области, отличающиеся блеском и шероховатостью с относительно гладкой или волнистой поверхностью, а также линии спаев, которые возникают при нарушении сплошности потока. Такого рода дефекты могут образовывать круглые или кольцевые зоны, систему бугорков и впадин или «полос». Существуют и другие трактовки термина «следы течения», что является отражением общей проблемы неустоявшейся терминологии, касающейся большей части дефектов внешнего вида литьевых деталей.

Поверхность литьевой детали при литье термопластов обычно формируется расплавом, поступающим к стенке формы из внутренних слоев потока через его фронт по механизму фонтанного течения (рис. 1) /9-11/.

Известно множество видов неустойчивого течения расплавов термопластов /12-13/, однако проявление неустойчивости течения в условиях литья под давлением имеет свои особенности, определяемыми геометрическими факторами, неизотермическими условиями и т.д.

Неустойчивое заполнение при литье термопластов не только вызывает дефекты поверхности литьевых деталей, ухудшая их внешний вид, но и ведет к искажению внутренней структуры /14/, что может негативно влиять на точность и эксплуатационные свойства деталей /15/.

В настоящем сообщении рассмотрены механизмы формирования «следов течения», вызванных некоторыми видами неустойчивого течения.

## **1. Перестройка течения на входе в полость формы. Струйное заполнение**

В области перехода от впускного литникового канала к полости формы происходит значительная перестройка фронта расплава /16/. При этом может возникать так называемое струйное течение (jetting, worming) /17-20/, к которому относят не только заполнение с образованием струи, но и течение, при котором в полости формы не образуется стабильного фронта потока. Вследствие струйного течения происходит значительное искажение структуры в объеме литьевой детали, а на ее поверхности часто возникают дефекты в виде линий спаев. Подобного рода дефекты, при отсутствии на поверхности детали явного следа струи, иногда называют «следами течения» /2, 21/.

Большинство авторов публикаций, вышедших в последнее время (например, /22-24/ и др.) связывают возникновение струйного заполнения с действием сил инерции на течение расплава в области входа в полость. Возникновению струйного течения могут способствовать ряд явлений,

затрудняющих переход к фонтанному течению в полости формы. Одно из таких нежелательных явлений - скольжение потока /25/ во впускном литниковом канале (для его предотвращения обычно не рекомендуется делать полировку впускных литниковых каналов) или в полости формы. Иногда предполагается, что на появление струи негативное влияние может оказывать гравитация, поэтому рекомендуется ориентировать форму так, чтобы заполнение не происходило сверху вниз /26/.

Из-за влияния эластичности полимерных расплавов диаметр струи при входе в полость ( $D$ ) превышает диаметр впускного канала ( $d$ ). Отношение диаметра струи к диаметру канала ( $D/d$ ) называют коэффициентом разбухания /27/. Если коэффициент разбухания равен или больше отношения толщины полости ( $H$ ) к диаметру впускного литникового канала ( $d$ ), при отсутствии скольжения по стенке полости, очевидно, струйное течение не возникает, а в полости формируется фонтанное течение /28/. Зависимость коэффициента разбухания от геометрических факторов и условий процесса при высоких скоростях сдвига, реализуемых при течении расплава во впускном литниковом канале, имеет сложный характер /28/. Длинные впускные литники, а также длинные переходные участки от разводящего литника к впускному уменьшают коэффициент разбухания из-за повышенной релаксации, способствуя тем самым появлению струйного заполнения /29/.

В общем случае, например при исследованиях с помощью капиллярного вискозиметра, струйное течение может быть устойчивым и неустойчивым. В условиях литья под давлением струя расплава всегда теряет устойчивость, в частности, из-за ее продольного изгиба под действием сжимающих напряжений /30/, возникающих при касании стенки полости. Кроме такой неустойчивости по Эйлеру могут возникать и разнообразные виды реологической неустойчивости струи, в том числе с ее поверхностным разрушением /31/. При сверхвысоких скоростях сдвига, которые крайне редко реализуются при литье термопластов, может наблюдаться так называемая рэлеевская неустойчивость (неустойчивость Рэлея-Плато), в результате которой под действием поверхностного натяжения происходит разрушение струи на отдельные капли /13, 32/. Следы капель остаются на поверхности готовой детали.

Под напором новых порций расплава, поступающих из литниковой системы, происходит разрыв поверхности струи или отрыв струи от впускного литникового канала. При этом формируется фронт расплава, заполняющий оставшееся свободное пространство полости формы. Из-за быстрого охлаждения следы струи остаются на поверхности готовой детали, хотя они могут изменяться при уплотнении расплава в полости формы на стадии подпитки.

Матовые (для непрозрачных материалов) или мутные (для прозрачных некристаллизующихся в условиях литья материалов) зоны вокруг впуска также называют «следами течения» /5, 33/, хотя для таких дефектов существуют специальные названия (blush, blush marks, blemish, halo effect, dull spot).

Из данных видеосъемки в форме с прозрачной вставкой процесса литья ненаполненного полипропилена в работе /34/ следует, что матовые пятна могут возникать в результате слабо выраженного струйного течения, когда струя проходит в полости на небольшое расстояние от впуска, и «размывается» потоком расплава. Этому способствует повышенный уровень диссипации тепла при течении расплава во впускном литнике и начальной области растекания в полости.

В ряде работ предполагается, что может происходить отрыв части уже застывшего поверхностного слоя полимерного материала во впускном литниковом канале под действием потока расплава, его скольжение по стенке и «вынос» в полость с образованием матовых или мутных пятен /35/. Были выдвинуты предположения и о других возможных механизмах возникновения матовых или мутных зон, в частности, о деформации поверхностного слоя и растрескивании из-за высоких ориентационных /26, 36/ и термических /37/ напряжений, недостаточном уплотнении области вокруг впуска /33/, разрушении расплава /2/, смещении поверхностного слоя при заполнении /38/, охлаждении расплава в литниковой системе /7/, явлении «задержки» расплава /5/ и др. Однако достоверные экспериментальные данные, подтверждающие эти предположения, до настоящего времени отсутствуют. В то же время практически все авторы сходятся в том, что для устранения струйного течения, а также матовых и мутных пятен необходимо изменить (обычно уменьшить) скорость течения при прохождении фронтом расплава впускного литникового канала и области вблизи впуска (используя профиль объемной скорости впрыска), повысить температуру расплава и формы, увеличить диаметр впускного литникового канала или применить веерный литник /1-2, 22, 26, 33, 35, 38-39/. Для уменьшения области струйного течения используют конструктивные решения, при

которых струя, если она возникает, направляется в стенку полости или знак, а также применяют впуск в прилив /2, 22, 33, 35/. В некоторых случаях проблема может быть решена путем введения закруглений в области перехода от впускного литникового канала к полости /38/ (это упрощает перестройку фронта расплава к фонтанному течению, но затрудняет отделение литника), а также при использовании полимерных добавок, повышающих коэффициент разбухания расплава /15, 37/.

При литье толстостенных деталей увеличение диаметра впускного литникового канала, желательное для улучшения уплотнения, может привести к значительному увеличению дефектной области со «следами течения» вокруг впуска. На рис. 2 показан пример толстостенной детали (толщина стенки 10 мм) из композиции на основе непластифицированного ПВХ с обширной дефектной областью, представляющей собой матовое пятно и линию спая вокруг центрального литника (диаметр литника на входе в изделие составляет 15 мм). На противоположной от впуска стенке детали также имеется дефектная область, хотя и меньшей площади, и линия спая вокруг нее.

Можно предположить, что данный дефект возникает вследствие струйного течения, причем струя существует только на участке от входа в полость до ближайшей стенки формы. Разрыв струи происходит в ее средней части, при этом растекающийся поток расплава прижимает остатки стенок струи к формирующим поверхностям, образуя «матовые пятна» и линии спая. На рис. 3 представлен предполагаемый механизм формирования дефекта.

## 2. Неустойчивое фонтанное течение. «Тигровые полосы»

Другим видом неустойчивости при литье термопластов является неустойчивость фонтанного течения на фронте потока, которая приводит к появлению «следов течения» в виде одиночных или повторяющихся «полос», отличающихся блеском и шероховатостью от других областей детали.

Как показали экспериментальные и теоретические исследования, различные виды нарушений фонтанного течения могут быть вызваны изменением условий контакта расплава со стенкой формы с одной стороны потока, например, при ступенчатом изменении толщины полости /40/, проявлением эластических свойств расплава /41-42/, неравномерностью температуры в сочетании с зависимостью вязкости расплава от температуры /43/ и др. причинами.

Возможность течения по фронту расплава от стенки к стенке («end-over-end») впервые была отмечена в 1961 году на основе результатов экспериментов по литью полиэтилена высокой плотности /44/. В ряде работ /45-46/ было экспериментально подтверждено существование неустойчивости в виде так называемого «несимметричного фонтанного течения».

Большой практический и теоретический интерес вызывает дефект «тигровые полосы» (tiger stripes), представляющий собой систему чередующихся полос с различным блеском. Области разного блеска расположены на противоположных сторонах литьевой детали со «сдвигом»: напротив области с высоким блеском находится область с низким блеском. Этот дефект характерен для полиэтилена низкой и высокой плотностей /47/, смесей поликарбоната и АБС-пластика /48-49/, смесей АСА-сополимера с каучуками /50/, гомополимеров и блок-сополимеров полипропилена /51/, а также композиций полипропилена с каучуками /52-54/, в том числе тальконаполненных. Для композиций полипропилена дефект может проявляться не сразу после литья, а при действии УФ-излучения или после отжига /55-56/.

Экспериментальное изучение данного дефекта показало, что изменение блеска «полос» вызвано различными причинами в зависимости от типа полимерного материала. Для смесей поликарбоната и АБС изменение блеска вызвано различным содержанием компонентов смеси: в области высокого блеска увеличено содержание поликарбоната, тогда как в зоне пониженного блеска наблюдается высокое содержание АБС /48/. В композициях полипропилена с каучуками изменение блеска связано с различной ориентацией каучуковой фазы /53-54/.

В докладе /52/ было впервые сделано предположение о том, что возникновение «тигровых полос» связано с периодической неустойчивостью фонтанного течения. Методами численного моделирования была показана теоретическая возможность такой неустойчивости, вызванной эластическими свойствами полимерных расплавов /57/. Был предложен механизм формирования «тигровых полос» для композиций полипропилена с каучуками /54/, учитывающий изменение

ориентации каучуковой фазы в поверхностном слое при периодической неустойчивости фонтанного течения.

Дефект «тигровые полосы», связанный с особенностями реологического поведения полимерных материалов, проявляется в широком диапазоне условий литья /51, 58/, и от него трудно или невозможно избавиться путем изменения технологического процесса. Был предложен ряд подходов, позволяющих снизить или полностью устранить данный дефект для композиций полипропилена. К ним относится использование полипропилена с более широким молекулярно-массовым распределением, блок-сополимеров пропилена и этилена с особой молекулярной структурой /59/, смесей полипропиленов (гомополимера и/или сополимеров с этиленом) /60/, смесей полипропиленов с сополимерами других альфа-олефинов /61-62/, а также специальных композиций и технологий смешения, обеспечивающих непрерывность каучуковой фазы /63/. Разработаны добавки для промышленно-выпускаемых композиций полипропилена на основе смесей сополимеров пропилена и этилена, устраняющие «тигровые полосы» /64/.

### **3. Неустойчивость, вызванная охлаждением фронта расплава**

Еще один вид неустойчивости течения связан с нарушением теплового баланса потока при недостаточно высокой скорости течения расплава, в результате чего происходит охлаждение потока и формирование на его фронте пленки из охлажденного полимерного материала. Из-за неравномерности охлаждения, охлажденная пленка обычно возникает только с одной (более холодной) стороны полости. Данное явление часто называют «задержкой» расплава (*hesitation*). Движение фронта расплава может продолжаться при обтекании такой пленки, ее деформации или разрыве (иногда следы пленки можно увидеть на поверхности детали при увеличении /65/) под действием увеличивающегося давления расплава. Для такого механизма течения в англоязычной литературе используются термины «go-over» /66/ или «getting over» /5, 33/. В результате на поверхности литевой детали остается след (*hesitation line*) в виде канавки, линии сгоя или полосы, отличающейся блеском и шероховатостью от основной части детали. Если это явление проявляется на тонкостенном участке изделия с большей основной толщиной, оно может приводить к недоливу на тонкостенном участке.

Экспериментальное и теоретическое изучение широко распространенного дефекта литевых деталей «грампластинка» (*record grooves, ripples, wave marks*) /26, 38, 67/, который также называют «следами течения», позволяет сделать вывод, что его причиной может являться «задержка расплава», которая в определенных условиях приобретает автоколебательный характер /66, 68-69/. Обсуждаются и альтернативные механизмы формирования данного дефекта, связанные с потерей устойчивости ориентированного поверхностного слоя в процессе заполнения /70/, неравномерной усадки части поверхностного слоя вблизи фронта расплава при заполнении /71/, периодического скольжения расплава относительно стенки /66/ и др.

Для устранения рассмотренных дефектов, связанных с охлаждением фронта расплава, необходимо обеспечить заполнение формы в режиме постоянной скорости впрыска (переключение на режим управления давлением должно происходить в самом конце процесса заполнения), подобрать адекватную для детали скорость впрыска, используя профиль скорости впрыска, повысить температуру формы и расплава /3, 22, 26, 33, 38, 66, 72/.

К неустойчивости данного вида может быть отнесена и неустойчивость, вызванная осцилляцией давления при впрыске, следствием которой является осцилляция скорости движения фронта расплава. Как показано в работе /73/ это приводит к появлению на поверхности детали чередующихся полос (без «сдвига») с различным блеском и шероховатостью.

## Литература

1. Bryce D.M. Thermoplastic troubleshooting for injection molders. Society of Plastics Engineers, 1991. 136 p.
2. Injection molding handbook. 3 rd edition / Ed. by D.V. Rosato, D.V. Rosato, M.G. Rosato. Kluwer Academic Publishers, 2000. 1457 p.
3. Injection molding guide. GE Plastics, 2001. 39 p.
4. Hatch B. The troubleshooter: Flow marks tell on moldmaker // *Inj. Mold. Mag.* 2005. № 11.
5. Moldflow design guide: A resource for plastics engineers / Ed. by J. Shoemaker. Hanser, 2006. 346 p.
6. Kamal M.R. Injection molding: Introduction and general background // *Injection molding: Technology and fundamentals* / Ed. by M.R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. Hanser, 2009. P. 3-70.
7. Hot runner user manual. Mold-Masters. 2010. <http://www.moldmasters.com>
8. ГОСТ 24105-80. Изделия из пластмасс. Термины и определения дефектов.
9. Tadmor Z. Molecular orientation in injection molding // *J. Appl. Polym. Sci.* 1974. V. 18. P. 1753-1772.
10. Mavridis H., Hrymak A.N., Vlachopoulos, J. Deformation and orientation of fluid elements behind an advancing flow front // *J. Rheol.* 1986. V. 30. № 3. P. 555-563.
11. Coyle D.J., Blake J.W., Macosko C.W. The kinematics of fountain flow in mold filling // *AIChE J.* 1987. V. 33. P. 1168–1177.
12. Малкин А.Я. Неустойчивость при течении растворов и расплавов полимеров // *Высокомолекулярный соединитель*. 2006. Т. 48. С. 1241-1262.
13. Larson R.G. Instabilities in viscoelastic flows // *Rheol. Acta.* 1992. V. 31. P. 213-263.
14. Ulcher Y., Cakmak M., Miao J., Hsiung C.M. Structural gradients developed in injection-molded syndiotactic polystyrene (sPS) // *J. Appl. Polym. Sci.* 1996. V. 60. P. 669-691.
15. Stevenson J.C., Fazez A.C. Vinyl molding compounds: Formulation and performance evaluation // *J. Vinyl Add. Tech.* 1997. V. 3, № 2. P. 118-125.
16. Yokoi H. Internal visualization of mold cavity and heating cylinder // *Injection molding: Technology and fundamentals* / Ed. by M.R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. Hanser, 2009. P. 398-438.
17. Spencer R.S., Gilmore G.D. Some flow phenomena in the injection molding of polystyrene // *J. Coll. Sci.* 1951. V. 6, № 2. P. 118-132.
18. Han C.D., Villamizar C.A. Development of stress birefringence and flow patterns during mold filling and cooling // *Polym. Eng. Sci.* 1978. V. 18, № 3. P. 173-179.
19. White J.L., Dietz W. Some relationship between injection moulding conditions and the characteristics of vitrified moulded parts // *Polym. Eng. Sci.* 1979. V. 19. P. 1081-1091.
20. Oezdemir A., Uluer O., Gueldas A. Flow front advancement of molten thermoplastic materials during filling stage of a mold cavity // *Polym. Test.* 2004. V. 23. P. 957-966.
21. Hatch B. The troubleshooter, Part 38: Acetal flow lines // *Inj. Mold. Mag.* 2000. № 3.
22. Литые пластмассы под давлением / Под ред. Т. Освальда, Л.-Ш. Тунга, П.Дж. Грэмманна. Пер с англ. под ред. Э.Л. Калинчева. – СПб: Профессия, 2006. 712 с.
23. Beaumont J.P. Runner and gating design handbook: Tools for successful injection molding. Hanser, 2004. 286 p.
24. Costa F.S., Ray S., Friedl C., Cook P.S., Xu S. The effect of inertia on fill pattern in injection molding // *59<sup>th</sup> SPE ANTEC Tech. Papers.* 2001. P. 454-459.
25. Denn M.M. Extrusion instabilities and wall slip // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2001. V. 33. P. 265–287.
26. Troubleshooting injection moulding. An Arburg guide / Ed. by V. Goodship Rapra Technology Ltd., 2004. 138 p.
27. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: Концепции, методы, приложения. – СПб: Профессия, 2007. 558 с.
28. Oda K., White J.L., Clark E.S. Jetting phenomena in injection mold filling // *Polym. Eng. Sci.* 1976. V. 16. P. 585-592.
29. Мэллой Р. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением. Перевод с англ. под ред. В.А. Брагинского, Е.С. Цобкалло, Г.В. Комарова. – СПб: Профессия, 2006. 512 с.
30. Kumar K.A., Graham M.D. Buckling instabilities in models of viscoelastic free surface flows // *J. Non-Newt. Fluid Mech.* 2000. V. 89. P. 337-351.
31. Tadmor Z., Gogos K.G. Principles of polymer processing. 2nd edition. John Wiley and Sons, 2006. 961 p.
32. Malkin A.Ya. Surface instabilities // *Coll. J.* 2008. V. 70, № 6. P. 673–689.
33. C-Mold design guide: A resource for plastics engineers. – Ithaca: Advanced CAE Technology Inc., 1998. 336 p.
34. Yanev A.S., Dias G.R., Cunha A.M. Direct visualization of conventional injection molding // *65<sup>th</sup> SPE ANTEC Tech. Papers.* 2007. P. 1097-1101.
35. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как сделать литьевую форму. Пер. с англ. под ред. В.Г. Дувидзона, Э.Л. Калинчева. – СПб: Профессия, 2006. 632 с.
36. Guide to surface defects on thermoplastic injection-molded parts. – Luedenscheid: Kunststoff-Institut Luedenscheid, K.I.M.W. NRW GmbH, 2001. 130 p.
37. Disson J.-P., Girois S. Acrylic process aids for PVC: From theoretical concepts to practical use // *J. Vinyl Add. Tech.* 2003. V. 9, № 4. P. 177-187.
38. Bichler M. Guide to flawless injection mouldings. - Heidelberg: Huethig Verlag. 1999. 112 p.
39. Olmsted B.A., Davis M.E. Practical injection molding. – N.Y., Basel: Marcel Dekker, 2001. 217 p.
40. Kanetoh Y., Yokoi H. Visualization analysis of melt flow behaviour at step-change portion using rotary runner exchange system // *Polymer Processing Society. 22<sup>nd</sup> Ann. Meet. Yamagata, Japan. July 2-6. 2006. Paper SP 5-P01.*
41. Bogaerds A.C.B., Hulsen M.A., Peters G.W.M., Baaijens F.P.T. Stability analysis of injection molding flows // *J. Rheol.* 2004. V. 48, № 4. P. 765-785.
42. Baltussen M.G.H.M., Hulsen M.A., Peters G.W.M. Numerical simulation of the fountain flow instability in injection molding // *J. Non-Newt. Fluid Mech.* 2010. V. 165. P. 631-640.
43. Gramberg H.J.J. Flow front instabilities in an injection moulding process. Thesis. –Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. 117 p.
44. Rielly F.J., Price W.L. Plastic flow in injection molds // *SPE J.* 1961. V. 17. P. 1097–1101.
45. Yokoi H., Masuda N., Mitsuhashi H. Visualization analysis of flow front behavior during filling process of injection mold cavity by two-axis tracking system // *J. Mater. Process. Tech.* 2002. V. 130-131. P. 328-333.
46. Yokoi H., Kaneton Y. Visualization analysis of fountain flow phenomenon by rotary runner exchange system. The 40<sup>th</sup> Int. Symp. on Macromolecules «Macro 2004». July 4-9. Paris. 2004.
47. Heuzey M.-C., Daly J.M., Gao D.M., Garsia-Rejon A. The occurrence of flow marks during injection molding of linear polyethylene // *55<sup>th</sup> SPE ANTEC Tech. Papers.* 1997. V. 43. P. 532-539.

48. Hamada H., Tsunasawa H. Correlation between flow mark and internal structure of thin PC/ABS blend injection moldings // *J. Appl. Polym. Sci.* 1996. V. 60. P. 353-362.
49. Hobbs S.Y. The development of flow instabilities during the injection-molding of multicomponent resins // *Polym. Eng. Sci.* 1996. V. 36, № 11. P. 1489-1494.
50. Chang M.C.O. Surface defect formation in the injection molding of acrylonitrile-styrene-acrylate polymers // *Int. Polym. Process.* 1996. V. 11, № 1. P. 76-81.
51. Xu G. Study of thin-wall injection molding. PhD Dissertation. The Ohio State University, 2004. 238 p.
52. Bulters M.A., Schepens A. The origin of the surface defects 'slip-stick' on injection moulded products // 16<sup>th</sup> PPS Annu. Meet. June 18-23. Shanghai, China. 2000. P. 144-145.
53. Patham B., Papworth P., Jayaraman K., Shu C., Wolkowicz M.D. Flow marks in injection molding of polypropylene and ethylene-propylene elastomer blends: Analysis of morphology and rheology // *J. Appl. Polym. Sci.* 2005. V. 96. P. 423-434.
54. Hirano K., Suetsugu Y., Kanai T. Morphological analysis of the tiger stripe on injection molding of polypropylene/ethylene-propylene rubber/talc blends dependent on based polypropylene design // *J. Appl. Polym. Sci.* 2007. V. 104, № 1. P. 192-199.
55. Hirano K., Tamura S., Kanai T. Striped-pattern deterioration and morphological analysis of injection molding comprising polypropylene/ethylene- $\alpha$ -olefin rubber blends. I. Influence of ultraviolet irradiation // *J. Appl. Polym. Sci.* 2007. V. 105. P. 2416-2426.
56. Hirano K., Tamura S., Obata Y., Kanai T. Striped-pattern deterioration and morphological analysis of injection molding comprising polypropylene/ethylene- $\alpha$ -olefin rubber blends. II. Influence of heating // *J. Appl. Polym. Sci.* 2008. V. 108. P. 76-84.
57. Grillet A.M., Bogaerds A.C.B., Peters G.W.M., Bulters M.J.H., Baaijens F.P.T. Numerical analysis of flow mark // *J. Rheol.* 2002. V. 46, № 3. P. 651-669.
58. Xu G., Koelling K.W. Study of flow marks during thin-wall injection molding // 59<sup>th</sup> SPE ANTEC Tech. Papers. 2001. V. 47. P. 604-607.
59. Патент США 6916886. Morioka T., Sakata K., Sugano T., Itou M., Hayakawa Y. Propylene block copolymer. Japan Polypropylene Corp. 2005.
60. Патент США 7446147. Naito M., Sakai I., Sugimoto Y., Tsubohara K. Propylene resin composition. Mitsui Chemicals, Inc. 2008.
61. Патент США 7504455. Grein C., Bernreitner K., Berger F. Propylene polymer compositions. Borealis Technology OY. 2009.
62. Патент США 7282537. Kanzaki S., Wakamatsu K. Propylene-based polymer, propylene resin composition, and injection molded article. Sumitomo Chemical Company. 2007.
63. Sherman L.M. Automotive TPOs: Improved processing, better appearance // *Plast. Tech.* 2009. V. 55, № 1. P. 29-32.
64. Заявка США 2009/0131576. Zanka Y., Ryosho Y., Shimizu K., Shimouse M., Mizukami S. Moldability modifier and polypropylene resin composition using the same. Japan Polypropylene Corp. 2009.
65. Казанков Ю.В. Частная информация. 1998.
66. Bozelli J.W. Find the source of visual defects // *Plast. Tech.* 2008. V. 54, № 7. P. 55-57.
67. Yoshii M., Kuramoto H., Kato K. Experimental study of transcription of smooth surfaces in injection molding // *Polym. Eng. Sci.* 1993. V. 33. P. 1251-1260.
68. Yoshii M., Kuramoto H., Kawana T., Kato K. The observation and origin of micro flow marks in the precision injection molding of polycarbonate // *Polym. Eng. Sci.* 1996. V. 36, № 6. P. 819-826.
69. Kang S.Y., Kim S.M., Lee W.I. Finite element analysis for wavelike flow marks in injection molding // *Polym. Eng. Sci.* 2007. V. 47, № 6. P. 922-933.
70. Lee T.H., Mills N.J. Surface roughness and impact strength of injection-moulded polystyrene // *J. Mater. Sci.* 1994. V. 29. P. 2704-2712.
71. Tredoux L., Satoh I., Kurosaki Y. Investigation of wavelike flow marks in injection molding: A new hypothesis for the generation mechanism // *Polym. Eng. Sci.* 2000. V. 40, № 10. P. 2161-2174.
72. Injection molding processing solutions. BASF Corp., 2001. 39 p.
73. Kazmer D.O., Garnavish K., Nageri R. An investigation into hesitation effects in oscillating flows // 63<sup>th</sup> SPE ANTEC Tech. Papers. 2005. P. 657-661.
74. Hopson P.L. The effect of polymer blending on environmental stress cracking resistance: Role of polycarbonate blend morphology, miscibility, and crystallinity. PhD Dissertation. The University of Southern Mississippi, 2005. 268 p.

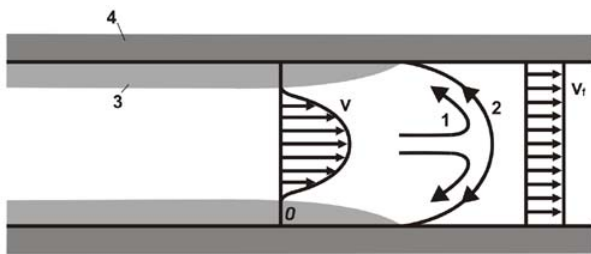


Рис. 1. Схема фонтанного течения при отсутствии скольжения расплава у стенки формы (на основе /9, 74/)

1- фонтанное течение (траектории движения частиц расплава), 2- фронт расплава, 3 – застывший слой полимерного материала, 4 – стенка формы,  $v$  – профиль линейной скорости течения внутри потока,  $v_f$  – профиль скорости движения фронта потока

Рис. 2. Общий вид детали (слева) и дефектная область вблизи впуска (справа). Стрелкой отмечен след линии разреза



Рис. 3. Предполагаемая схема образования поверхностного дефекта

1- литниковый канал, 2- полость формы, 3 – застывший слой полимерного материала, 4 – фронт расплава

