

## **Повышение качества спаев при литье изделий из термопластов под давлением**

Барвинский И.А. Барвинская И.Е.

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

*IV международный инструментальный саммит на выставке Росмолд. 4 июня 2009. Москва.  
Препринт.*

Низкое качество спаев является одной из распространенных проблем литья термопластичных материалов. Появление спаев часто приводит к ухудшению внешнего вида, прочности и других эксплуатационных характеристик литьевого изделия. Хотя первые работы по исследованию спаев относятся к концу 1930-х – началу 1940-х годов /1-2/, и этой теме посвящено несколько обзоров /3-5/, глав монографий /6-8/ и множество статей, проблема спаев остается одной из наиболее сложных проблем литья термопластов и по-прежнему вызывает интерес исследователей.

Спаи образуются при соединении фронтов потоков расплава в процессе заполнения литьевой полости. Важно учитывать, что в понятие спая входит не только след на поверхности изделия. Спай является трехмерным объектом, который занимает некоторую часть пространства вблизи поверхности контакта потоков. При изучении оптических свойств прозрачных изделий со спаями видно, что с точки зрения оптики дефектной является вся область контакта потоков, а не только та ее часть, которая отмечена следом на поверхности изделия /9/. Проблема внешнего вида и прочности спаев связана с нарушением структуры полимерного материала в области контакта потоков, зависящей от локальных условий формирования спая.

Следы на поверхности изделия, визуально похожие на следы спаев, могут возникать при струйном течении и других видах неустойчивого заполнения литьевой полости. Хотя подобные следы нередко относят к спаям, процессы их формирования имеют свои особенности и закономерности и в данном сообщении не рассматриваются.

Повышение качества спаев при литье термопластов достигается при использовании конструктивных и технологических методов, правильном выборе материала изделия, а также применении специальных технологий литья. Эти методы не являются универсальными и, давая ощутимый эффект в одном случае, в другом – могут оказаться бесполезными. При выборе оптимального метода необходимо учитывать механизм формирования спая и особенности поведения конкретного полимерного материала.

Внешний вид изделия со спаем зависит в первую очередь от глубины и ширины так называемой V-образной канавки, которая возникает на поверхности изделия при образовании спая. Можно выделить несколько этапов формирования этой канавки. Канавка появляется на начальной стадии образования спая как недолив, этому способствует близкое к нулевому давление на фронте потока расплава, а также сопротивление имеющегося в полости воздуха, если вентиляция формы не достаточно эффективна. Окончательная форма канавки определяется деформацией застывшего поверхностного слоя полимерного материала под действием давления расплава в области спая, а также усадочными процессами. Значение этих факторов в формировании окончательной геометрии поверхностной канавки меняется в зависимости от реологических, механических и усадочных характеристик полимерного материала. Начальная V-образная форма канавки связана с формой фронтов потоков расплава, но в ходе процесса в некоторых случаях она может значительно измениться /10/. Из-за влияния усадки иногда вместе с канавкой или вместо канавки на поверхности изделия может возникать бугорок или система бугорков.

Хотя V-образная канавка оказывает влияние на прочность спая, действуя как концентратор напряжений /11-13/, прочность изделия со спаем определяется другими явлениями, которые происходят во внутренней части спая. С точки зрения теории молекулярной диффузии прочность спая зависит от глубины самодиффузии макромолекул через поверхность контакта потоков /14/. При этом самодиффузия происходит только во внутренней части поверхности контакта, тогда как с наружной стороны существует область плохой связанности потоков или даже разрыв между потоками в виде трещины, продолжающейся от канавки вглубь спая /7, 15/.

Большое влияние на прочность спая оказывает площадь поверхности контакта потоков, которая зависит от конфигурации внутренней части спая, а также неравномерность усадочных процессов в области спая, связанная с ориентацией полимера и наполнителей, и другие факторы.

Качество спая во многом зависит от условий течения расплава вблизи спая и связанного с ним тепловыделения после начала его формирования. Диссипация тепла при течении расплава в области спая уменьшает скорость охлаждения полимерного материала, что благоприятно влияет на внешний вид и прочность спая. Спай, вблизи которого течение расплава прекращается сразу после его образования, называют «холодным» спаем (cold weld), а спай, вблизи которого течение расплава продолжается – «горячим» спаем (hot weld). Для этих же видов спая применяют соответственно названия спай «в стык» (weld line, butt weld) и спай «в касание» (meld line, melt line, streaming weld line). Такая классификация спаев широко использовалась на начальном этапе изучения этой проблемы.

## Конструктивные методы

Одной из распространенных рекомендаций по повышению качества спаев является изменения конструкции и/или мест впуска, позволяющие изменить картину растекания расплава в полости и преобразовать спай «в стык» – в спай «в касание». Подобное решение обсуждалось еще в патенте 1940 года /2/. Однако экспериментальные исследования показали, что различия внешнего вида и прочности для спаев «в стык» и в «касание» часто оказываются незначительными. Например, из 25 материалов, исследованных в работе /16/, только в одном случае относительная прочность спая «в касание» превышала прочность спая «в стык» более чем на 10% (относительная прочность спая определяется как выраженное в процентах отношение прочности образца со спаем к прочности образца без спая). Как показали исследования, проведенные в последние годы, небольшие различия характеристик спаев «в стык» и «в касание» связаны с тем, что локальные условия их формирования часто очень похожи /13, 17-19/.

На качество спая может оказывать большое влияние его положение относительно места впуска. При этом спай, расположенный в конце полости, может иметь лучший внешний вид, чем спай, расположенный вблизи впуска, если длина потока не слишком велика. Это объясняется тем, что промежуток времени от начала образования спая до окончания фазы нарастания давления для спая, расположенного в конце потока, значительно меньше, чем для спая, расположенного вблизи впуска. Более тонкий застывший поверхностный слой полимерного материала для спая, расположенного в конце полости, легче деформируется под действием высокого давления, что способствует уменьшению конечной глубины поверхностной канавки.

Пространственная конфигурация области контакта потоков часто оказывается одним из важнейших факторов, определяющих прочность спая. Деформация внутренней области спая зависит от градиента давления расплава, реализующегося в литейной полости после начала формирования спая. Экспериментальные исследования показывают, что даже небольшое нарушение баланса потоков в полости при ее заполнении (оно связано с конструкцией изделия и литниковой системы), нежелательное с точки зрения точности размеров изделия, может приводить к существенной деформации внутренней части спая /20/, тем самым, способствуя значительному повышению прочности изделия.

Пониженное качество спаев характерно для тонкостенных изделий, и увеличение толщины стенки во многих случаях способствует улучшению внешнего вида и повышению относительной прочности изделия со спаем (см., например, /21/). В то же время имеются примеры, когда при увеличении толщины относительная прочность спая не изменяется или даже снижается /22/.

## Выбор материала изделия

Правильный выбор полимерного материала часто является ключевым моментом для получения качественного изделия со спаем. Для одинаковой глубины и ширины поверхностной канавки визуальное восприятие изделия будет различным при использовании разных полимерных материалов. В одном случае можно получить четкий спай, тогда как в другом – малозаметный след.

Качество спаев обычно ухудшается при повышении содержания наполнителей, что обусловлено неравномерной ориентацией и концентрацией наполнителей вблизи спая, а также другими факторами. Неравномерность ориентации и концентрации наполнителя приводит к неравномерности процесса усадки и появлению остаточных напряжений в области спая.

Ориентация жестких волокнистых наполнителей (например, стеклянного и углеродного волокна) /23-24/, дисперсных наполнителей с частицами в форме пластинок или чешуек (слюда, чешуйки алюминия и т.д. /8/) определяется локальными условиями течения расплава в процессе

формирования спая. Локальное нарушение концентрации наполнителей в области спая связано в частности с тем, что частицы наполнителей не могут пересечь поверхность контакта потоков.

Низким качеством спаев отличаются широко распространенные эластифицированные термопласты, а также термопластичные полиолефины (ТРО), что объясняется влиянием неравномерной ориентации дисперсной каучуковой фазы в области спая. Разработаны методы повышения качества спаев для подобных материалов при использовании специальных рецептур (с применением компатибилизаторов и т.д.) и технологий смешения (например, для обеспечения непрерывной эластичной фазы /25/).

### **Технологические методы**

Повышение температуры формы снижает скорость охлаждения полимерного материала, что способствует улучшению внешнего вида и прочности спая. Для кристаллизующихся материалов температура формы часто является важнейшим фактором, определяющим прочность спая. При очень низких температурах формы видимая линия спая может распространяться на все изделие /12/.

Повышение температуры расплава в большинстве случаев благоприятно влияет на прочность спая, однако известны примеры снижения прочности тонкостенных изделий при повышении температуры расплава в некотором температурном диапазоне из-за влияния молекулярной ориентации /26/.

Характер влияния скорости впрыска и давления выдержки на качество спаев зависит от особенностей полимерного материала, конструкции изделия и прочих факторов. Есть примеры, когда прочность изделия со спаем, отлитого из полистирола общего назначения без выдержки под давлением, превышает прочность изделия, полученного при обычном давлении выдержки /27/.

### **Специальные технологии литья**

Предложен ряд специальных технологий литья термопластов, позволяющих повысить качество спаев.

При литье с быстрым разогревом формующей поверхности /28-30/ обеспечивается разогрев до высокой температуры и последующее охлаждение формующих деталей в каждом цикле литья, что дает возможность значительно улучшить внешний вид спая. Предложено несколько разновидностей данной технологии, в которых применяются различные методы нагрева и охлаждения ФОД.

Идея управления градиентом давления в литьевой полости после начала формирования спая с целью деформирования внутренней части поверхности контакта потоков реализована в нескольких вариантах. В работе /31/ использовали простые клапаны, позволяющие кратковременно снизить давление в определенной зоне литьевой полости и получить требуемое смещение внутренней области спая. Сложный профиль поверхности контакта потоков получается при периодическом изменении направления течения расплава после заполнения литьевой полости, такой режим управления течением расплава достигается в технологиях SCORIM (Shear controlled orientation injection molding) /32/ и Push-Pull /33/.

Эффект упрочнения спаев наблюдается в технологии литья с предварительным сжатием расплава (X-melt) компании Engel /34/.

Повышение качества спаев происходит при литье с вибровоздействием /35/, при ультразвуковом воздействии /36/, а также при использовании для оформления круглых отверстий знаков, вращающихся в процессе заполнения полости расплавом /21, 37/. Для уточнения возможностей и ограничений данных методов требуется их дальнейшее изучение.

## Литература

1. Патент США 2182400. Husted H.R. Method of molding plastic material. 1939.
2. Патент США 2191703. Anderson D.M. Method and means for eliminating the weld line during thermoplastic molding. 1940.
3. Criens R.M., Mosle H.-G. Knit-lines in injection molding and mechanical behavior // *Failure of plastics* / Ed. by W. Brostow, R.D. Corneliusen. H. – Vienna: Hanser Publishers, 1986. P. 415-429.
4. Кузнецов В.В., Ушакова Н.Б., Половинкина Т.П., Паничев В.Г. "Спай" при литье под давлением изделий из термопластов. – М.: НИИТЭХим. 1991. 19 с.
5. Fellahi S., Meddad A., Fisa B., Favis B.D. Weldlines in injection-molded parts: A review // *Adv. Polym. Tech.* 1995. V. 14. P. 169-195.
6. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. – М.: Химия. 1974. 270 с.
7. Malloy R.A. Plastic part design for injection molding: an introduction. Hanser, 1994. P. 47-63.
8. Wheeler I. Metallic pigments in polymers. Rapra Technology Ltd., 1999. 246 p.
9. Han J., Yan C., Shen C., Liu C. Birefringence distribution in injection molded parts with weld lines // *SPE ANTEC Tech. Papers.* 2007. V. 53. P. 657-661.
10. Mielewski D.F., Bauer D.R., Schmitz P.J., Van Oene H. Weld line morphology of injection molded polypropylene // *Polym. Eng. Sci.* 1998. V. 38, № 12. P. 2020-2028.
11. Hagerman E.M. Weld-line fracture in molded parts // *Plast. Eng.* 1973. V. 29, № 10. P. 67-69.
12. Hobbs S.Y. Some observations on the morphology and fracture characteristics of knit lines // *Polym. Eng. Sci.* 1974. V. 14, № 9. P. 621-626.
13. Yamada K., Tomari K., Ishiaku U.S., Hamada H. Evaluation of mechanical properties of adjacent flow weldline // *Polym. Eng. Sci.* 2005. V. 45. P. 1180-1186.
14. Akkerman R., Rekers G., Carleer B.D., Huetink J., Bulters M.J.H., Schepens H.A.J. Thermomechanical contact elements for healing in polymers // *Contact Mechanics, computational techniques. 1 st Int. Conf. on Contact Mechanics* / Ed. by M.H. Aliabadi, C.A. Brebbia. – Southampton: Computational Mechanics Publications, 1993. P. 103-110.
15. Tomari K., Tonogai S., Harada T., Hamada H., Lee K., Moril T., Maekawa Z. The V-notch at weld lines in polystyrene injection moldings // *Polym. Eng. Sci.*, 1990. V. 30, № 15. P. 931-936.
16. Quinn K.R., Duffy J.A., Ellis C.S. Reinforced thermoplastics: Understanding weld-line integrity. LNP Engineering Plastics Inc. Bulletin № 204. 1997. 6 p.
17. Yamada K., Tomari K., Harada T., Hamada H. Fracture behavior of weldline in polystyrene injection moldings // *SPE ANTEC Tech. Papers.* 2002. V. 48.
18. Nguyen-Chung T. Flow analysis of the weld line formation during injection mold filling of thermoplastics // *Rheol. Acta.* 2004. V. 43. P. 240-245.
19. Yamada K., Tomari K. Evaluation of molecular orientation of weldline region in polycarbonate by laser Raman spectroscopy // *SPE ANTEC Tech. Papers.* 2007. V. 53. P. 600-604.
20. Fathi S., Behravesh A.H. Visualization of the flow history contours at the cross-section of a weld-line in an injected molded part // *J. Appl. Polym. Sci.* 2008. V. 109. P. 412-417.
21. Ершов Л.А., Листков В.М., Мнацаканов С.С. Литье под давлением изделий сложной формы из наполненного полиэтилена. –Л.: ЛДНТП, 1979. 20 с.
22. Merhar C.F., Beiter K.A., Ishii K. Weld-line strength in injection molded PVC parts. *SPE ANTEC Tech. Papers*, 1994. P. 3450-3454.
23. Meddad A., Fisa B. Weldline strength in glass fiber reinforced polyamide 66 // *Polym. Eng. Sci.* 1995. V. 35, № 11. P. 893-901.
24. Roth S., Kuehnert I., Mennig G. Fiber orientation in weld-line areas – Investigation of an air intake manifold // *SPE ANTEC Tech. Papers.* 2003. V. 49. P. 730-735.
25. Sherman L.M. Automotive TPOs: Improved processing, better appearance // *Plast. Tech.* 2009. Jan.
26. Kim S.-G., Suh N.P. Performance prediction of weldline structure in amorphous polymers // *Polym. Eng. Sci.* 1986. V. 26, № 17. P. 1200-1207.
27. Koster R.P. Importance of injection molding parameters for mechanical performance of cold flow weld lines // *J. Inj. Mold. Tech.* 1999. V. 3, № 3. P. 154-158.
28. Патент Великобритании 2081171A. Wada A., Tazaki K., Tahara T., Suzuki H., Mizutani Y. Injection molded articles with improved surface characteristics, production of same and apparatus therefore. 1982.
29. Патент США 5362226. Kataoka H., Umei Y. Mold for synthetic resin molding. 1994.
30. Kim D.H., Kang M.-H., Chun Y.H. Development of a new injection molding technology: Momentary mold surface heating process // *J. Inj. Mold. Tech.* 2001. V. 5, № 4. P. 229-232.
31. Gardner G, Malloy R. Moving boundary technique to strengthen weld lines in injection molding // *SPE ANTEC Tech. Papers.* 1994. V. 40. P. 626-630.
32. Патент Великобритании 2170142A. Allan P.S., Bevis M.J. Molding process. 1996.
33. Malloy R., Gardner G., Grossmann E. Improving weld line strengths using a multi-live feed injection molding process // *SPE ANTEC Tech. Papers.* 1993. V. 39. P. 521-529.
34. Koponen M., Enqvist J., Nguyen-Chung T., Mennig G. Advanced injection molding mold and molding process for improvement of weld line strengths and isotropy of glass fiber filled aromatic polyester LCP // *Polym. Eng. Sci.* 2008. V. 48, № 4. P. 711-716.
35. Hallowell D.J., Coulter J.P. Weldline strength in products manufactured through vibration-assisted injection molding // *SPE ANTEC Tech. Papers.* 2001. V. 47.
36. Lu C., Yu X., Guo S. The mechanism of ultrasonic improvement of weld line strength of injection molded polystyrene and polystyrene / polyethylene blend parts // *J. Polym. Sci. Polym. Phys.* 2006. V. B44. P. 1520-1530.
37. Smith G.F., Goodship V., Ogur E.O., Stidworthy P. Smart 'in mould' manipulation of materials // *Plast. Rubber Compos.* 2008. V. 37, № 2/3/4. P. 88-95.