



а) – при испытании балки по нормальному сечению
 б) – при испытании балки по наклонному сечению

Рисунок 6 – Способы крепления преобразователей линейного перемещения на балках

УДК 624.012.36

П. В. КРИВИЦКИЙ, В. Н. МАЛИНОВСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ С ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ОТОГНУТОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ АРМАТУРОЙ

В статье представлены основные результаты выполненных экспериментальных исследований и сопоставительный анализ процессов трещинообразования и разрушения балок с отогнутой и прямолинейной напрягаемой арматурой. Полученные данные позволили определить особенности напряженно-деформированного состояния приопорных зон и факторы, влияющие на сопротивление изгибу с поперечной силой предварительно напряженных железобетонных балочных элементов с полого отогнутой канатной арматурой.

Введение. В настоящее время основным направлением в мировой технической политике является создание эффективных строительных конструкций. Эффективность железобетонных конструкций достигается не только постоянным улучшением механических и физических свойств материалов, но и внедрение новых конструктивных и технологических решений, направленных на повышение пригодности конструкций к нормальной эксплуатации и сопротивлению их внешним воздействиям. Использование железобетонных балочных конструкций с отгибом части продольной предварительно напрягаемой арматуры из нижней зоны в пролете в верхнюю на опорах показывает эксплуатационную эффективность, неоспоримую экономичность, и целесообразную пригодность внедрения в практику строительства. Но основным препятствием для широкого применения подверженных изгибу железобетонных конструкций с полого отогнутой преднапряженной арматурой является недостаточная изученность сопротивления таких элементов изгибу с поперечной силой, а применяемые методики расчета прочности сечений, наклонных к продольной оси, требуют уточнений. При этом установлено, что на прочность сечений, наклонных к продольной оси элементов с прямолинейной продольной преднапряженной арматурой, оказывают влияние такие факторы, как прочность бетона, высота сечения элемента, пролет среза, сила обжатия бетона. Очевидно, что напряженно-деформированное состояние в зоне среза балок при нагружениях зависит и от начального напряженно-деформированного состояния, отличающегося в зависимости от того обжатия произведено прямолинейной или отогнутой арматурой. Изучение влияния основных факторов на сопротивление внешним воздействиям и исследование отличительных особенностей напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с полого отогнутой предварительно напрягаемой канатной арматурой рассматривается в данной статье.

Характеристика опытных образцов

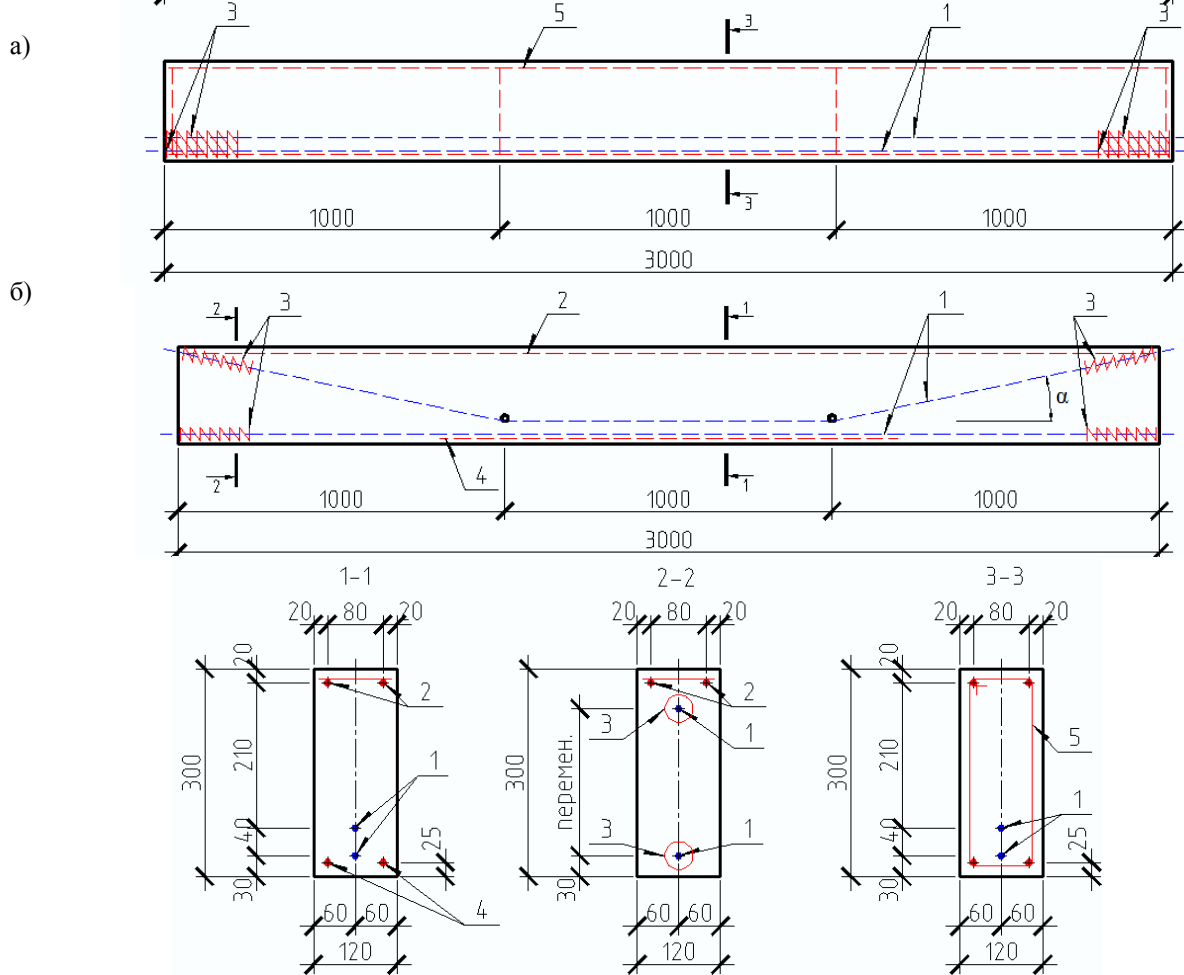
Для выявления отличительных особенностей в напряженно-деформированном состоянии железобетонных балок с полого отогнутой преднапряженной арматурой, в сравнении с балками с прямолинейной арматурой, были выполнены экспериментальные исследования и сопоставительный анализ процессов трещинообразования и разрушения балок с отогнутой и прямолинейной напрягаемой арматурой. В качестве опытных образцов применялись предварительно напряженные балки прямоугольного

поперечного сечения с размерами $b \times h = 120 \times 300$ мм длиной 3,0 м (расчетный пролет 2,6 м), выполненные из бетона средней кубиковой прочностью, варьирующейся в пределах 51–58 МПа. Армировались балки в растянутой зоне двумя канатами диаметром 12,5 мм ($A_{st} = 1,86 \text{ см}^2$), расположенные один над другим (верхний и нижний канат) в плоскости изгиба. Коэффициент армирования составлял 0,62 %. В опытных балках применялись канаты с временным сопротивлением $f_{pk} = 1830$ МПа и согласно нормам [1] соответствует классу Y1860S7. Для усиления прочности нормальных сечений в зоне чистого изгиба дополнительно принималась ненапрягаемая арматура $2\text{Ø}16$ S500 с $A_{st} = 4,02 \text{ см}^2$ у нижней и $2\text{Ø}12$ S500 с $A_{sc} = 2,26 \text{ см}^2$ у верхней граней опытных балок. Конструктивные данные опытных балок отражены на рисунке 1 и в таблице 1.

В опытных образцах с прямолинейной преднапряженной канатной арматурой (серия БП) предусматривалось поперечное армирование количеством больше и меньше минимального $\rho_{sw, \min}$. Конструктивное решение балок с полого отогнутой канатной арматурой (серия БО) характеризовалось отсутствием поперечного армирования. Серия БП применялась для выявления отличий в напряженно-деформированном состоянии балок с отогнутой и прямолинейной канатной арматурой, а также для оценки вклада нагельного эффекта ненапрягаемой стержневой продольной арматуры и поперечного армирования в сопротивлении срезу.

Балки серии БП имели два напрягаемые каната расположенные прямолинейно и армировались пространственным каркасом КП – I, содержащий продольную ненапрягаемую арматуру и поперечные ортогональные замкнутые хомуты из проволоки $\text{Ø} 3$ и 5 мм с пределом текучести 542 и 555 МПа. Расположена в опорной зоне поперечная арматура с шагом $s = 100$ мм.

В образце БП – 1 в теле бетона в опорных зонах балок предусматривалась анкеровка напрягаемой арматуры при помощи гильзовых зажимов. В балках БП – 2 гильзовые зажимы отсутствовали.



а) – балки с прямолинейной напрягаемой арматурой; б) – балки с отогнутой напрягаемой арматурой.
1 – семипроволочные канаты диаметром 12,5 мм; 2 – стержневая арматура $2\text{Ø}12$ S500; 3 – спирали косвенного армирования; 4 – стержневая арматура $2\text{Ø}16$ S500; 5 – пространственный каркас

Рисунок 1 – Армирование опытных образцов

Таблица 1 – Основные конструктивные характеристики опытных балок

Серия	Марка балок	Угол отгиба напрягаемого каната, град	Величина преднапряжения нижних канатов, МПа	Величина преднапряжения верхних канатов, МПа	Пролет среза, см	Расчетный пролет, м
БП	БП – 1	–	972	980	80	2,6
	БП – 2	–	981	975	80	2,6
БО – I	БО – I – 1	9,0	946	928	80	2,6
	БО – I – 2	9,0	941	920	80	2,6
	БО – I – 3	9,0	934	915	80	2,6
	БО – I – 4	9,0	958	921	62,5	2,25
	БО – I – 5	12,0	947	930	80	2,6
	БО – I – 6	9,0	796	780	80	2,6

В балках группы БО преднапрягаемые верхние канаты в третях пролета отгибались из нижней зоны в пролете в верхнюю на опорах. Угол наклона отгиба составил 9° . В балках серий БО и БП относительное усилие натяжения канатов с учетом потерь составляло $\sigma_{sp}/f_{p0,1k} = 0,58 \div 0,59$.

В образце БО – I – 3 на концевых участках прямолинейных и отогнутых канатов предусматривалась дополнительная анкеровка напрягаемой арматуры по принципу анкеровки арматуры балки БП – 1.

Влияние угла наклона отогнутого каната изучалось на балке БО – I – 5, в которой верхний канат отгибался под углом 12° .

В балке БО – I – 6 уровень относительного предварительного натяжения отогнутых и прямолинейных канатов составляла $\sigma_{sp}/f_{p0,1k} = 0,43 \div 0,44$.

Испытывались опытные балки, за исключением балки БО – I – 4, при относительном пролете среза $a/h=2,67$ по схеме балка на двух опорах, нагруженная двумя сосредоточенными силами. В образце БО – I – 4 относительный пролет среза составлял 2,08.

Процесс трещинообразования и характер разрушения опытных балок

В образцах серии БП прочность бетона составляла $f_{cm,cube}^G = 51 \div 53$ МПа, усилие натяжения канатов с учетом потерь – $\sigma_{sp}/f_{p0,1k} = 0,59$. Канаты в данных балках располагались прямолинейно по длине балки.

Первые нормальные трещины в данных балках с шириной раскрытия $W_k < 0,05$ мм формировались при суммарной нагрузке $2F_{exp} = 70 \div 85$ кН под пролетным грузом или в непосредственной близости от него в зоне действия изгибающих моментов. При последующем нагружении трещины равномерно появлялись на всем участке между грузами с шагом $S_{gr} = 50 \div 100$ мм. В зоне одновременного действия изгибающих моментов и поперечных сил, при последующем возрастании нагрузки, вблизи пролетной сосредоточенной силы (на длине ~ 150 мм от отгиба к опоре), зафиксированы нормальные трещины, переходящие в слабонаклонные к вертикали.

При нагрузке $2F_{exp} = 110 \div 125$ кН в балках БП в средней трети высоты сечения над верхним предварительно напряженным канатом, образовывались наклонные трещины с шириной раскрытия не превышающей $W_k = 0,05$ мм. Такой характер трещинообразования имеет место в балках с прямолинейным расположением преднапряженной арматуры, в которых по причине не погашения преднапряжения бетона внешним нагружением на значительном участке обжатого бетона приопорной зоны не создаются условия к формированию наклонных трещин с нижней грани [2].

В балке БП – 1 при последующем нагружении после образования первых наклонных трещин формировались с шириной раскрытия до $W_k=0,05$ мм ближе к опоре новые наклонные трещины с меньшим углом наклона к продольной оси, а раскрытие имевшихся трещин приостанавливалось. При нагрузке $2F_{exp}=170$ кН появилась и сразу получила значительное развитие магистральная трещина над верхним канатом. Однако при подходе к нижнему продольному канату ее дальнейшее развитие приостанавливалось. По всей видимости на раскрытие данной трещины сказалось наличие поперечной и продольной арматуры в балке. За несколько этапов до разрушения ($2F_{exp} = 200$ кН) на концевых участках, несмотря на наличие анкеровки напрягаемой арматуры гильзовыми зажимами в балке БП – 1 было зафиксировано втягивание канатов относительно торца балки, которое возросло при дальнейшем увеличении нагружения. В момент разрушения угол наклона магистральной диагональной трещины составлял $\theta = 34^{\circ}$ (рисунок 2).

В балке БП – 2, образовавшиеся наклонные трещины на ступенях нагружения, предшествующих исчерпанию несущей способности, распространялись как в растянутую, так и в сжатую зоны с одновременным раскрытием их до $W_k = 1,2$ мм. Наличие в теле бетона на опорных участках спирального косвенного армирования в сочетании с арматурной обоймой, образованной пространственным каркасом (балка БП – 2) предотвратило втягивание канатов на всех этапах нагружения, несмотря на отсутствие гильзовых зажимов.

В балке БП – 2 при суммарной нагрузке $2F_{\text{exp}} = 140 \div 170$ кН начали формироваться с шагом $S_{\text{cr}} = 50 \div 80$ мм и углом наклона $\theta = 35^\circ$ диагональные трещины в уровне верхнего продольного каната. При дальнейшем нагружении появилась диагональная трещина в направлении опора-пролетный груз с направлением параллельным ранее образовавшимся трещинам (рисунок 2), но ее развитие в дальнейшем не наблюдалось.

Разрушение образца БП – 1 произошло по магистральной наклонной трещине со сдвигом обеих частей при суммарной нагрузке $F_{\text{exp}} = 230$ кН. Опытный образец БП – 2 разрушился вследствие раздробления бетона сжатой зоны на участке между пролетными грузами при $F_{\text{exp}} = 270$ кН.



Рисунок 2 – Трещинообразование и разрушение опытных балок серии БП

В балках серии БО прочность бетона составляла $f_{\text{cm,cube}}^G = 51 \div 57$ МПа и верхний ряд предварительно напряженных канатов в третях пролета отогнут к продольной оси элемента под углом $\alpha = 9^\circ$. Усилие натяжения канатов с учетом потерь для балок серии БО, за исключением балки БО – I – 6, принято $\sigma_{\text{sp}}/f_{\text{p0,1k}} = 0,59$. В балке БО – I – 6 относительное усилие натяжения канатов с учетом потерь – $\sigma_{\text{sp}}/f_{\text{p0,1k}} = 0,49$. В образце БО – I – 3, в отличие от вышеупомянутых балок, на концевых участках прямолинейных и отогнутых канатов дополнительно устанавливались инвентарные анкера. Испытывались данные балки при относительном пролете среза $a/h = 2,67$. Испытание балки БО – I – 4 осуществлялось при относительном пролете среза $a/h = 2,08$. Верхний канат в балке БО – I – 5 в третях пролета отгибался под углом $\alpha = 12^\circ$.

При нагружении балок серии БО, несмотря на разные пролеты среза, усилия обжатия бетона и дополнительную анкерровку напрягаемой арматуры, первыми образовывались при нагрузке $2F_{\text{exp}} = 60 \div 70$ кН по всей длине зоны «чистого» изгиба нормальные к продольной оси элемента трещины. Шаг трещин составлял $S_{\text{cr}} = 80 \div 120$ мм, ширина раскрытия их достигала $W_k = 0,05$ мм. При дальнейшем увеличении нагружения образовывались с таким же шагом и раскрытием нормальные трещины и в сечениях непосредственно или вблизи приложения пролетной силы со стороны отгиба арматуры, однако, дойдя до уровня отогнутых канатов, их развитие приостанавливалось (рисунок 3).

При последующем возрастании внешней нагрузки ($2F_{\text{exp}} = 90 \div 110$ кН) с удалением от точки перегиба каната в сторону опоры на длине $120 \div 220$ мм ($d/2 \div d$) образовывались новые нормальные трещины, которые при дальнейшем увеличении нагрузки «переходили» в слабонаклонные к вертикали и их развитие, дойдя до уровня отогнутого каната, вначале приостанавливалось, а затем в месте пересечения трассировки отогнутого каната изменяли направление на более пологое. В зоне пересечения с трассировкой отогнутых канатов данные трещины приобретали «z – образную» траекторию. Данное обстоятельство наблюдалось и ранее при испытаниях балок с предварительно напряженной стержневой [2] и канатной [3] отогнутой арматурой, проводимых в БрГТУ и НИИЖБе.

За несколько ступеней нагружения, предшествовавших исчерпанию несущей способности балок ($2F_{\text{exp}} = 115 \div 120$ кН), в опорных зонах ранее и вновь образовавшиеся наклонные трещины развивались как к верхней так и к нижней граням, образуя явно выраженные диагональные трещины. Ширина раскрытия их в уровне трассировки отогнутого каната достигала $W_k = 0,1$ мм, выше – 0,15 мм и ниже – 0,4 мм. По одной из диагональных трещин (магистральной) происходило разрушение балок с раздроблением сжатого бетона в конце магистральной наклонной трещины в балках БО – I – 1, БО – I – 2 или срезом бетона сжатой зоны в балках БО – I – 3 ÷ БО – I – 6. Угол наклона магистральной трещины в зоне пересечения с отогнутым канатом составлял $26 \div 38^\circ$.

Уменьшение относительного пролета среза для образца БО – I – 4 повысило нагрузку трещинообразования, а уменьшение усилия обжатия бетона в балке БО – I – 6 привело к более раннему появлению нормальных трещин. Незначительное увеличение угла отгиба верхнего каната в балке БО – I – 5, как постановка в балке БО – I – 3 дополнительных анкеров не повлияли на процесс трещинообразования. В целом данные обстоятельства не сказались на общей картине расположения трещин и характере разрушения опытных балок.

Таким образом, исчерпание несущей способности опытных балок серии БО характеризовалось разрушением по диагональной трещине со сдвигом двух частей балок.

Основные результаты экспериментальных исследований опытных балок представлены в таблице 2. На рисунках 2 и 3 показан процесс развития трещин и характер разрушения опытных балок после их испытания.

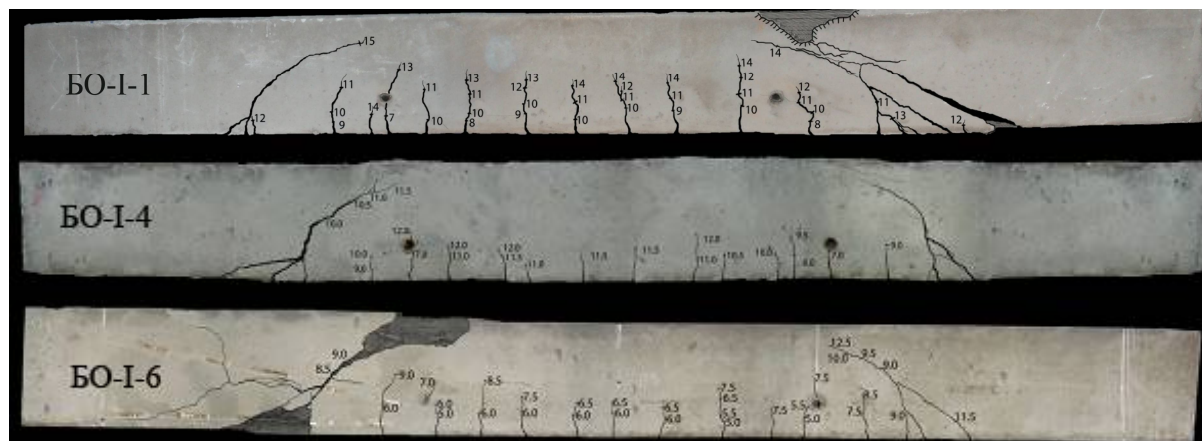


Рисунок 3. – Трещинообразование и разрушение опытных балок группы БО

Таблица 2 – Основные результаты экспериментальных исследований

Серия	Марка балок	Появление нормальных трещин $2F_{\text{exp.сг}}$, кН	Появление наклонных трещин в зоне «среза» $2F_{\text{exp.сг}}$, кН	Общая разрушающая нагрузка $2F_{\text{exp}}$, кН	Характер разрушения
БП	БП – 1	85	125	230	По наклонной трещине со сдвигом обеих частей балки
	БП – 2	70	115	270	По наклонному сечению с раздроблением бетона сжатой зоны
БО	БО – I – 1	70	120	154	По наклонной трещине с раздроблением бетона над трещиной
	БО – I – 2	60	120	148	То же
	БО – I – 3	65	115	145	– ” –
	БО – I – 4	70	130	158	По наклонной трещине со срезом бетона сжатой зоны
	БО – I – 5	65	120	148	То же
	БО – I – 6	45	115	132	– ” –

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования совместно со сформированной базой более ранних опытов по изучению влияния отгиба на напряженно-деформированное состояние приопорных участков балок с полого отогнутой арматурой позволили определить отличительные особенности влияния основных факторов на сопротивление элемента изгибу с поперечной силой:

1. Изменение уровня обжатия бетона путем обеспечения соответствующей анкеровки прямолинейной и отогнутой арматуры влияет на места формирования и угол наклона магистральной диагональной трещины, что сказывается на сопротивлении балок срезу.

2. Наличие на всей приопорной зоне преднапряженного отгиба продольной канатной арматуры обеспечивает необходимую трещиностойкость наклонных сечений, но создает условия к формированию наклонных трещин с растянутой зоны. В балках с прямолинейной арматурой в силу сосредоточения действия усилия обжатия бетона создаются условия для образования магистральной наклонной трещины в средней трети высоты сечения.

3. С целью повышения сопротивляемости железобетонных балок с отогнутой преднапряженной арматурой рекомендуется необходимую анкеровку канатной арматуры обеспечивать постановкой дополнительных приспособлений и устройств.

Presence on all near support regions of prestressed bent – up rope longitudinal reinforcement provides necessary of shear resistance, but creates conditions to formation of inclined cracks from the tension region. In beams with rectilinear reinforcement owing to a concentration of action of prestress force conditions for formation of the main inclined crack in an average third of height of section are created.

Список литературы

1. Арматура напрягаемая канатная для железобетонных конструкций. Технические условия: СТБ EN 10138-3-2009. – Введ. 16.09.2009. – Минск: М – во архит. и строит. РБ, 2009. – 13 с.
2. Малиновский, В. Н. Сопrotивление предварительно напряженных балок из высокопрочного бетона с отогнутой стержневой арматурой при изгибе с поперечной силой : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В. Н. Малиновский ; Ленинградский инж. – стр. инс – т. – Ленинград, 1988. – 24 с.
3. Сасонко, Л. В. Исследование изгибаемых предварительно напряженных железобетонных конструкций с отогнутой арматурой: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Л. В. Сасонко ; НИИЖБ. – М., 1974 – 22 с.

УДК 541.64:536.7

Т. А. МАЦЕЕВИЧ, М. Н. ПОПОВА, А. А. АСКАДСКИЙ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОВМЕСТИМОСТИ ПОЛИМЕРОВ. АНАЛИЗ СОСТАВА МИКРОФАЗ И РЯДА СВОЙСТВ СМЕСЕЙ

Предложена расчетная схема для прогнозирования совместимости полимеров, которое осуществляется на основании химического строения повторяющихся звеньев. Для осуществления прогноза одних параметров растворимости Гильдебранда, входящих в параметр взаимодействия Флори-Хаггинса $\chi_{1,2}$, недостаточно. Необходимо учитывать поверхностные силы и межфазное натяжение при смешении полимеров, их молекулярный вес и степень разветвления, энергию межмолекулярного взаимодействия, температуру, ван-дер-ваальсов объем и молярный объем повторяющихся звеньев.

В основе расчетной схемы для прогнозирования совместимости полимеров лежит критерий растворимости полимеров в органических растворителях [1 – 4], учитывающий химическое строение полимера и растворителя, поверхностные силы и энергию межмолекулярного взаимодействия между полимером и растворителем. При введении одного полимера в другой один из них рассматривается как «растворитель». Теоретически рассмотрены случаи полной совместимости полимеров, частичной совместимости и абсолютной несовместимости. Приведены зависимости температуры стеклования от состава ряда смесей и показано хорошее согласие с экспериментальными данными. Проанализирована возможность оценки состава микрофаз при микрофазовом расслоении частично-совместимых полимеров.

Наибольшее влияние на совместимость оказывает молекулярный вес полимера и степень его разветвленности. При малом молекулярном весе полимера существенную роль оказывают концевые группы, имеющие иное химическое строение, чем строение повторяющегося звена. При большом молекулярном весе основную роль играют размеры так называемых глобул связей, а также характер межмолекулярного взаимодействия полимеров. В случае разветвления, если химическое строение разветвлений кардинально отлично от химического строения основной цепи, его влияние на совместимость является основополагающим.

Влияние температуры на параметр растворимости полимеров, их поверхностную энергию и молярный объем не столь велико, чтобы существенно изменить параметры, входящие в критерий растворимости. В результате, если полимерная смесь находится в стеклообразном состоянии, влияние температуры на совместимость незначительно. ЭВМ-программа «Каскад» (ИНЭОС РАН), частью которой является опция «совместимость полимеров», позволяет определять все физические характеристики, входящие в критерий растворимости, и осуществлять прогноз совместимости в автоматическом режиме после изображения химических структур компонентов на экране дисплея и введения значений молекулярного веса и степени ориентации полимеров.

Список литературы

1. А.А. Аскадский, Ю.И. Матвеев, М.С. Матевосян Высокомолек. соед. А. 1990, 32(10), 2157.
2. А.А. Askadskii. Physical Properties of Polymers. Prediction and Control. Amsterdam. Gordon and Breach Publishers. 1996.
3. А.А. Askadskii. Computational Materials Science of Polymers. Cambridge. Cambridge International Science Publishing. 2003.
4. А.А. Аскадский, А.Р. Хохлов. Введение в физико-химию полимеров. М.: «Научный Мир», 2009