



DOI 10.5862/JEST.238.4

УДК 621.315.35

Ю.В. Соловьев, А.Н. Назарычев

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Yu.V. Solovyev, A.N. Nazarychев

THE ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL IMPACTS ON MECHANICAL DAMAGES GROWTH IN POLYMERIC INSULATION OF COVERED CONDUCTORS

Обоснована практическая важность исследования характера влияния технологических факторов на эксплуатационные свойства полимерной защитной изоляции проводов воздушных линий электропередачи. Показано, что структура полиэтиленовой защитной изоляции весьма чувствительна к таким технологическим факторам, как качество исходного сырья, состав рецептур применяемых материалов, технологические режимы сшивки и экструзии защитной изоляции. На отдельных примерах показано влияние технологических факторов на микроструктуру поверхности защитной изоляции, которая определяет ее стойкость к окислению и смачиванию водой. На основе проведенных испытаний получены экспериментальные зависимости эксплуатационных характеристик защитной изоляции от основных технологических параметров при изготовлении – времени сшивки и скорости экструзии, которая определяют степень ориентированности молекул и плотность пространственной сетки защитной изоляции провода. Общей закономерностью полученных зависимостей является увеличение относительного удлинения и прочности материала на разрыв при возрастании линейной скорости экструзии.

ПОЛИМЕРНАЯ ЗАЩИТНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ; ПОЛИЭТИЛЕН; СШИВКА; ЭКСТРУЗИЯ; ПОВРЕЖДЕНИЕ.

Practical importance of studying the nature of technological factors influencing the performance properties of polymeric insulation of covered conductors is found. It is shown that the structure of polyethylene insulation is very sensitive to such technological factors as the quality of raw material, the composition of the materials used, technological modes of crosslinking and extrusion of insulation covering. The given examples show the influence of technological factors on the microstructure of covering insulation, which determines its resistance to oxidation and wetting. On the basis of executed tests the experimental curves were obtained for the relationship between the main performance properties and the technological parameters, such as as cross-linking time and extrusion rate which define the degree of molecule orientation and density of the three-dimensional structure of material inside polymeric insulation of the covered conductor. A common pattern in the obtained graph functions is the increase of relative lengthening and durability of the material when linear speed of extrusion molding of the process increases.

POLYMERIC COVERING INSULATION; POLYETHYLENE; CROSS-LINKING; EXTRUSION MOLDING, DAMAGE.

Появление новых конструкций проводов воздушных линий (ВЛ) с полимерной защитной изоляцией, отсутствие достаточного опыта их эксплуатации, недостаточная изученность

свойств изоляционных и оболочковых материалов, а также условий и характера развития в них дефектов ставят перед эксплуатационными службами электросетевых предприятий новые

задачи, направленные на своевременное выявление повреждений проводов. Поэтому проведение отдельного исследования с целью оценки влияния технологических факторов на эксплуатационные свойства защитной изоляции проводов ВЛ весьма актуально.

Представители электросетевых предприятий на основании накопленного опыта эксплуатации ВЛ с защищеннымными проводами отмечают не всегда удовлетворительное качество используемых полимерных оболочковых и изоляционных материалов, чьи характеристики во многом определяют эксплуатационные свойства защитной изоляции проводов ВЛ. Стремление производителей снизить себестоимость зачастую приводит к ухудшению качества выпускаемой продукции. Снижение затрат при производстве в основном достигается за счет применения более дешевых сырья [1] и технологического оборудования, изменения рецептур материалов, режимов сшивки и экструзии защитной изоляции. Этим тенденциям способствует отсутствие единых требований к составу и качеству изоляционных композиций: каждый производитель вправе разрабатывать собственные технические условия на выпускаемую продукцию. В результате эксплуатационные характеристики защитной изоляции проводов одной марки, но разных производителей существенно различаются [1–4]. Как следствие, состояние защитной изоляции, определяющей преимущества защищенных проводов, изменяется крайне неодинаково в одних и тех же условиях эксплуатации на ВЛ.

Предпосылки для проведения исследования

На состояние полимерной защитной изоляции (ПЗИ) провода при эксплуатации существенно влияют механические напряжения, возникающие в ПЗИ при одновременных растяжениях, изгибах и кручениях провода под действием ветровых и гололедных нагрузок. В условиях необратимого естественного старения полимерных материалов эти нагрузки создают условия для развития трещин и других механических повреждений, нарушающих целостность защитной изоляции провода (рис. 1).

В этих условиях важными эксплуатационными характеристиками материала ПЗИ, определяющими его стойкость к механическим воздействиям, являются прочность и относительное удлинение при разрыве, которые, в свою очередь, зависят от чистоты и качества исходного сырья, а также технологических режимов изготовления защитной изоляции.

На формирование гололедных отложений на поверхности провода существенно влияют молекулярная структура полимерного материала и микрорельеф наружной поверхности ПЗИ, зависящие от параметров технологических режимов сшивки и экструзии изоляции. Это подтверждают результаты зарубежных исследований [2], которые показывают, что структура и микрорельеф наружной поверхности ПЗИ проводов одной марки, но разных производителей сильно различаются (рис. 2–5).

На рис. 2–5 структура поверхности образцов ПЗИ характеризуется пористостью, что может



Рис. 1. Образование трещин в ПЗИ проводов

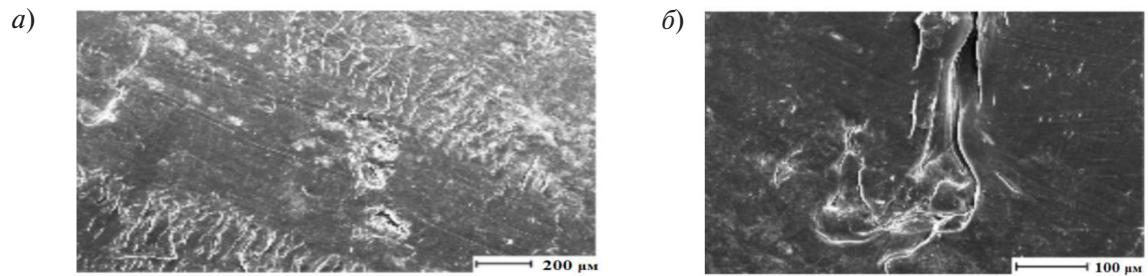


Рис. 2. Структура и микрорельеф поверхности исходного (а) и состаренного (б) образцов ПЗИ провода изготовителя №1

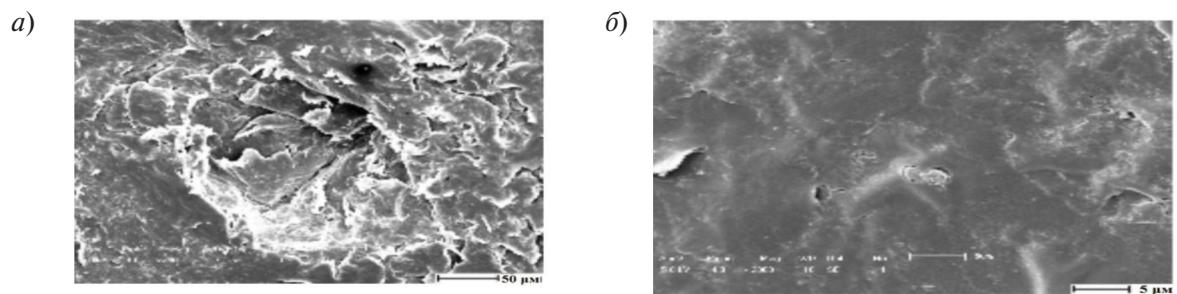


Рис. 3. Структура и микрорельеф поверхности исходного (а) и состаренного (б) образцов ПЗИ провода изготовителя №2

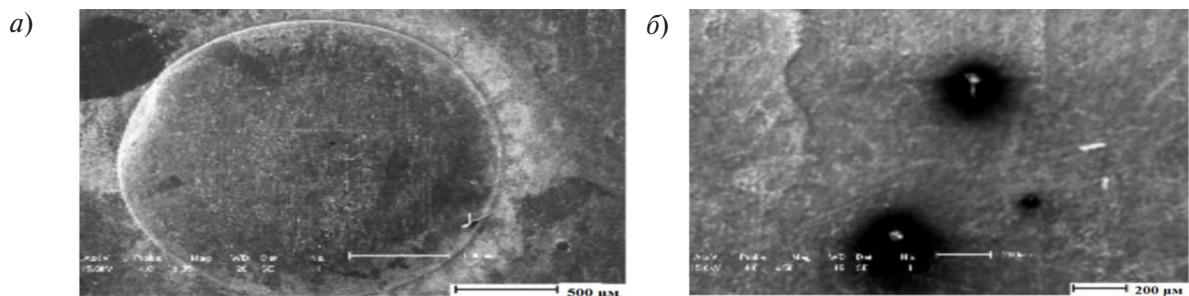


Рис. 4. Структура и микрорельеф поверхности исходного (а) и состаренного (б) образцов ПЗИ провода изготовителя №3

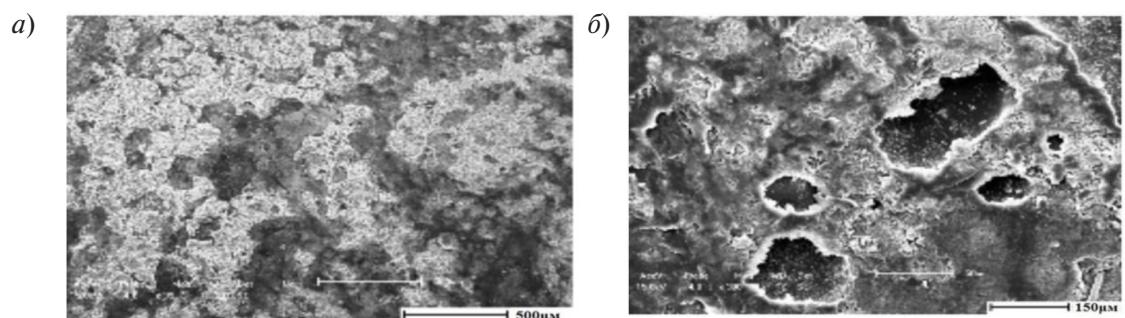


Рис. 5. Структура и микрорельеф поверхности исходного (а) и состаренного (б) образцов ПЗИ провода изготовителя №4

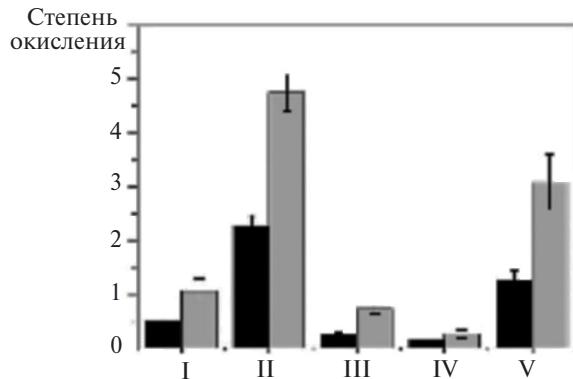


Рис. 6. Характер изменения степени окисления исходных (темный цвет) и состаренных (светлый цвет) образцов ПЗИ проводов одной марки пяти различных производителей [2]

быть обусловлено выходом водяных паров и газов, образующихся при сшивке полиэтилена.

При анализе стойкости ПЗИ провода к термоокислительной деструкции при комплексном воздействии механических и температурных нагрузок важным эксплуатационным параметром служит величина тепловой деформации, которая зависит от рецептуры исходной полимерной композиции и концентрации антиоксидантов. Опыт эксплуатации показал, что со временем первоначальная концентрация антиоксидантов в защитной изоляции снижается. В результате материал защитной изоляции окисляется, становится хрупким и более подверженным расщеплению при внешних эксплуатационных воздействиях на провод. Применение рецептур изоляционных композиций с различной исходной концентрацией антиоксидантов приводит к

существенному различию первоначальной степени окисления ПЗИ проводов одной марки, но разных производителей (рис. 6).

Необходимо заметить, что в одних и тех же условиях эксплуатации скорость изменения как степени окисления ПЗИ, так и тепловой деформации, характеризующие стойкость ПЗИ к расщеплению, будут сильно различаться для проводов одной марки, но разных производителей. Это связано с применением различных технологических режимов изготовления ПЗИ, что подтверждается результатами исследования [5], согласно которым тепловая деформация и прочность материала ПЗИ при разрыве определяются плотностью молекулярной сетки, зависящей от технологических параметров сшивки (рис. 7).

При нарушении технологии сшивки и режимов экструзии защитной изоляции возможны грубые технологические дефекты, приводящие к снижению прочности материала на разрыв, расщеплению и механическим повреждениям ПЗИ проводов (рис. 8).

Применение различных материалов в конструкции провода приводит к появлению остаточных механических напряжений в защитной изоляции из-за температурного градиента и различия в тепловом расширении материала жилы провода и полимера при экструзии защитной изоляции. В случае отсутствия уплотнения и компактирования жилы провода внутренняя поверхность защитной изоляции будет иметь неровности, обусловленные скруткой проволок внешнего повивы жилы. Вблизи неровностей формируются области неоднородности молеку-

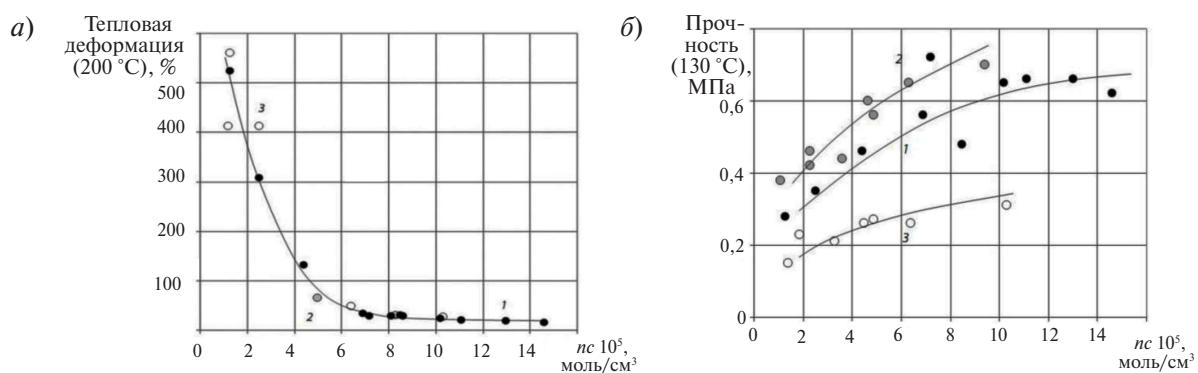


Рис. 7. Зависимость тепловой деформации (а) и прочности при разрыве (б) от плотности пространственной сетки полиэтилена: 1 – сианольная сшивка; 2 – пероксидная сшивка; 3 – радиационная сшивка

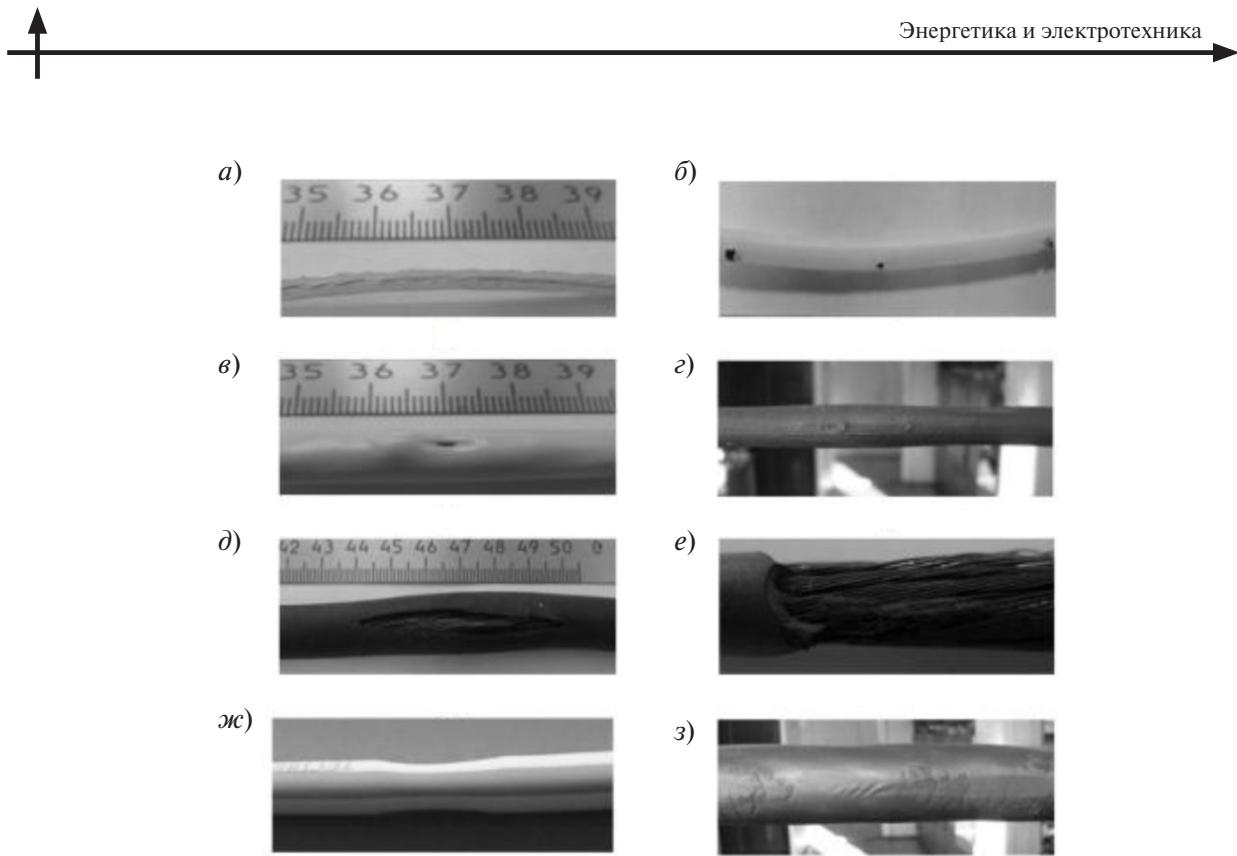


Рис. 8. Грубые технологические дефекты ПЗИ проводов: (а, е – частичный отрыв; б – неоднородности структуры; в, г, д – локальные разрывы и вздутия; жс – местное утонение; з – наплывы)

лярной сетки при сшивке полиэтилена и экструзии защитной изоляции. Высота таких неровностей для провода марки СИП-3 составляет 0,8–1,2 мм при средней толщине изоляции 2,3 мм. То есть область структурных неоднородностей и трещинообразования составляет порядка 35–50 % объема материала защитной изоляции. Это приводит к существенному снижению прочности на разрыв материала защитной изоляции.

Обозначенные положения легли в основу проведения лабораторного исследования по установлению зависимостей прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве и тепловой деформации образцов защитной изоляции провода от основных варьируемых технологических параметров – времени сшивки и скорости экструзии изоляции.

Постановка задачи исследования

На отдельных лабораторных образцах полиэтилена из силанольно-сшиваемой композиции LE 4421 (марка Visico), полученных путем проведено исследование защитной изоляции

проводы марки СИП-3 1×95-20 кВ (толщина ПЗИ провода – $\Delta_{из} = 2,3$ мм). Целью исследования было получить зависимости прочности при разрыве, относительного удлинения при разрыве и тепловой деформации образцов от времени сшивки и скорости экструзии изоляции. Учитывалось, что линейная скорость экструзии следующим образом зависит от частоты W вращения шнека при изготовлении провода указанной марки:

Частота вращения шнека, об/мин	Скорость экструзии, м/мин
30	10
50	17
80	26

Условия проведения испытаний

Испытания образцов проведены с учетом требований стандартов [6, 7]. Испытуемые образцы выдержаны в течение 15 минут при температуре 200 °С и растягивающей нагрузке 0,2 МПа, что соответствует требованиям стандарта МЭК 60502 для оценки качества сшивки мате-

риала. В качестве испытательного оборудования использовалась разрывная машина марки Tinius Olsen H5KS [8], а также термокамера марки Binder серии M, обеспечивающая максимальную температуру нагрева 300 °C [9].

Результаты испытаний

По результатам испытаний образцов получены зависимости тепловой деформации ε_t (рис. 9), относительного удлинения при разрыве ε_p (рис. 10, 12), прочности при разрыве σ_p (рис. 11, 13) от времени сшивки и линейной скорости экструзии.

Как видно на рис. 9, тепловая деформация уменьшается с увеличением времени сшивки и плотности молекулярной сетки в полиэтилене. Следует предположить, что с увеличением толщины и объема ПЗИ провода скорость изменения тепловой деформации будет снижаться. При этом с увеличением времени сшивки и уменьшением скорости экструзии увеличивается плотность молекулярной сетки полимера, что приводит к снижению относительного удлинения испытуемого образца при разрыве (рис. 10).

В то же время прочность материала при разрыве растет в среднем на 1–2 МПа (рис. 11). С увеличением линейной скорости экструзии растет скорость потока расплава материала, что приводит к увеличению степени полимеризации.

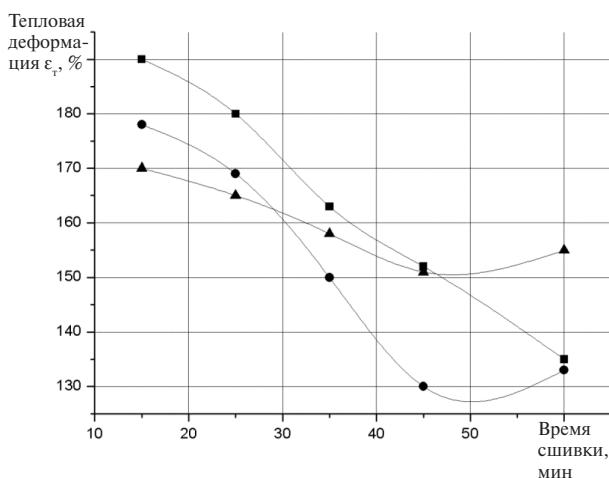


Рис. 9. Зависимости тепловой деформации ε_t испытуемых образцов от времени сшивки при различных линейных скоростях экструзии: ■ – 26 м/мин; • – 17 м/мин; ▲ – 10 м/мин

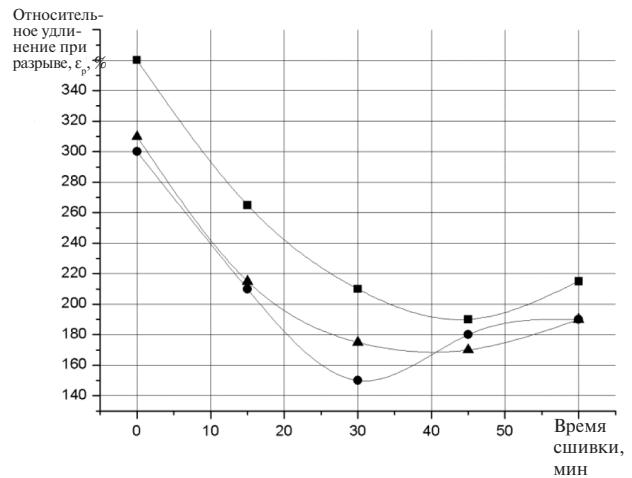


Рис. 10. Зависимости относительного удлинения ε_p испытуемых образцов при разрыве от времени сшивки для различных линейных скоростей экструзии:
■ – 26 м/мин; • – 17 м/мин; ▲ – 10 м/мин

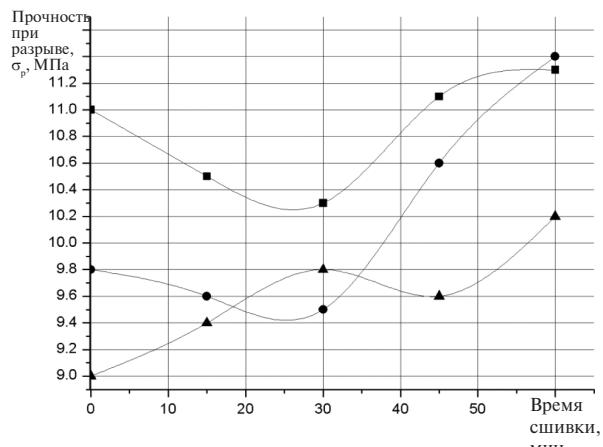


Рис. 11. Зависимость прочности испытуемых образцов при разрыве σ_p от времени сшивки для различных линейных скоростях экструзии:
■ – 26 м/мин; • – 17 м/мин; ▲ – 10 м/мин

Вследствие зависимости плотности пространственной межмолекулярной сетки от линейной скорости экструзии важна оценка зависимости эксплуатационных свойств от скорости экструзии (рис. 12–13). Общей отмеченной при испытаниях закономерностью является увеличение относительного удлинения и прочности материала на разрыв при возрастании линейной скорости экструзии. Это связано с увеличением объема кристаллической фазы, не успевающей пройти технологическую сшивку при повышенной скорости экструзии и подстрав-

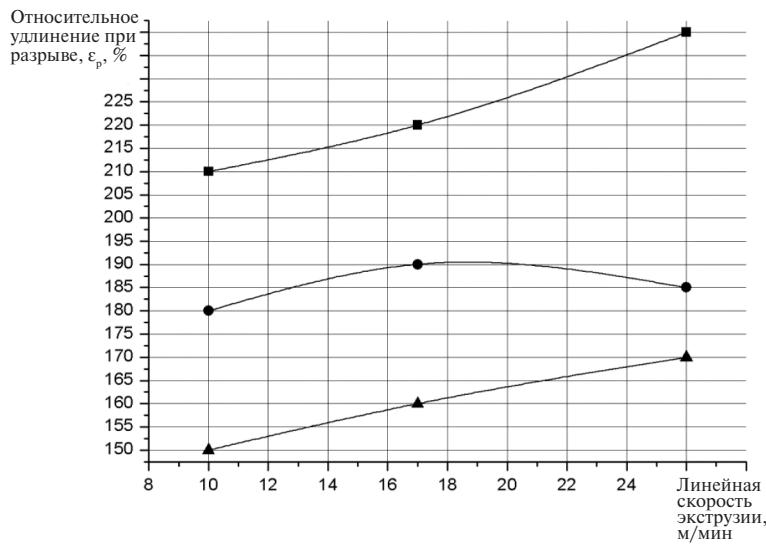


Рис. 12. Зависимость относительного удлинения ϵ_p испытуемых образцов при разрыве от линейной скорости экструзии для различной длительности сшивки: ■ — 50 мин; • — 40 мин; ▲ — 30 мин

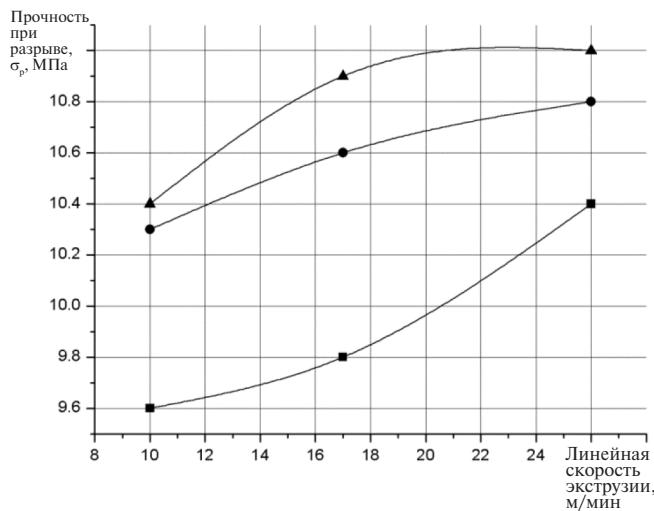


Рис. 13. Зависимость прочности при разрыве σ_p испытуемых образцов ПЗИ СИП-3 1×95-20 от линейной скорости экструзии для различной длительности сшивки:
■ — 30 мин.; • — 40 мин; ▲ — 50 мин

ивающейся под внешнюю нагрузку, что подтверждается остаточной деформацией материала. Молекулы воды при сианольном сшивании полиэтилена беспрепятственно диффундируют в аморфную область, где и происходит процесс сшивки.

При малых скоростях экструзии в объеме превалирует аморфная фаза полиэтилена и, как

следствие, существенно больший объем оказывается сшитым. При высоких скоростях молекулы воды не успевают диффундировать в область кристаллической фазы. Следует отметить, что температура сшивки существенно ниже температуры плавления полиэтилена, и образование сетки идет в гетерогенной системе — главным образом в аморфных областях между кристалли-

тами полиэтилена [5]. В результате этого образующаяся пространственная сетка неоднородна, что снижает несущую способность материала изоляции.

Результаты проведенных испытаний хорошо согласуются с теорией и результатами независимых исследований [10], что говорит о достоверности полученных экспериментальных данных.

Выводы

Полученные результаты позволили установить закономерности изменения эксплуатационных свойств ПЗИ проводов (прочность при разрыве σ_p , относительное удлинение при разрыве ε_p , тепловая деформация ε_t) при изменении технологических параметров, среди которых основными являются время сшивки и скорость экструзии. Обосновано существенное влияние скорости экструзии на ориентацию молекул и плотность пространственной сетки материала

ПЗИ, определяющие величину тепловой деформации и прочности при разрыве. Из полученных результатов экспериментальных исследований следует вывод о необходимости обеспечения строгого контроля времени сшивки при изменении скорости экструзии. Требуемые значения эксплуатационных характеристик защитной изоляции провода (σ_p , ε_p , ε_t) согласно п. 5.2.5.1 ГОСТ 31946-2012 достигаются при минимальной скорости экструзии 26 м/мин и временах сшивки не менее 60 минут.

Для получения стабильных характеристик защитной изоляции рекомендуется проводить входной контроль поставляемого сырья. Чистота исходного материала имеет большое значение при наложении защитной изоляции. Рекомендуется принимать меры по исключению вероятности попадания загрязнений в сырье не только на стадии поставки, но также при загрузке материала в экструдер на стадии изготовления защитной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорова Н.А., Муравьева Т.Н. Исследование влияния концентрации красителя на физико-механические характеристики оболочковых кабельных пластикатов // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-технической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ.Ч.1 СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 29–30.
2. Nobrega A.M., Martinez M.L.B., Alencar de Queiroz A.A. Investigation and Analysis of Electrical Aging pf XLPE Insulation for Medium Voltage Covered Conductors manufactured in Brazil // IEEE Trans. D. E. I. 2013. № 20(2). Р. 628–640.
3. Иванова В.Н., Муравьева Т. Н. Физико-механические характеристики изоляции из сшитого полиэтилена // Материалы научно-методической конференции «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах». СПб., 2012. С. 20.
4. Иванов Д.А., Муравьева Т. Н. Исследование физико-механических характеристик кабельной изоляции из сшитого полиэтилена // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. Ч. 1. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 19–20.
5. Лямин Д.И. Сравнительная оценка плотности и стабильности химической сетки полиэтиленовой изоляции кабельных изделий при термомеханическом воздействии. // Кабель-news. 2010. №3. С. 73–77.
6. ГОСТ Р МЭК 60811-1-1-2011. Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей. Измерение толщины и наружных размеров. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2013. 14 с.
7. ГОСТ Р МЭК 60811-1-2-2011. Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей. Часть 1-2. Методы общего применения. Методы теплового старения. М.: Стандартинформ, 2012. 12 с.
8. Tinius Olsen H5KS [электронный ресурс]. URL: <http://www.tiniusolsen.com/pdf/B140D.pdf> (дата обращения 11.10.2014)
9. Operating Manual APT.LineTM M53 [электронный ресурс] URL: <http://www.binder-world.com/de> (дата обращения 15.10.2014)
10. Ким В.С. Исследование влияния технологических факторов производства самонесущих изолированных проводов на механические свойства изоляции из сшитого полиэтилена // Науковедение. 2013. № 3. С. 1–7.



REFERENCES

1. **Sidorova N.A., Muravyeva T.N.** Issledovaniye vliyaniya kontsentratsii krasitelya na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki obolochkovykh kabelnykh plastikatov [Research of colourant concentration impact on physical and mechanical properties of PVC cable insulation] *Nedelya nauki SPbGPU: materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Institut energetiki i transportnykh sistem SPbGPU. Ch. 1* [Science week at SPbGPU: Proceedings of scientific international conference. Power Energy and Transport Systems Institute of SPbGPU. Part 1] St.Petersburg: SPbGPU Publ. 2014. S. 29–30 (rus).
2. **Nobrega A.M., Martinez M.L.B., Alencar de Queiroz A.A.** Investigation and Analysis of Electrical Aging pf XLPE Insulation for Medium Voltage Covered Conductors manufactured in Brazil. *IEEE Trans. D. E. I.* 2013. 20(2). P. 628–640.
3. **Ivanova V.N., Muravyeva T.N.** Fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki izolyatsii iz sshitogo polietilena [Physical and mechanical properties of XLPE insulation]. *Materialy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsii v natsionalnykh issledovatel'skikh universitetakh»* [Proceedings of scientific conference on Fundamental Researches and Innovations at National Research Universities]. St.Petersburg, 2012. S. 20.
4. **Ivanov D.A., Muravyeva T.N.** Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik kabelnoy izolyatsii iz sshitogo polietilena [Research of phisical and mechanical properties of XLPE cable insulation]. *Nedelya nauki SPbGPU: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii c mezhdunarodnym uchastiyem. Institut energetiki i transportnykh sistem SPbGPU. Ch. 1.* [Science week at SPbGPU: Proceedings of scientific international conference. Power Energy and Transport Systems Institute of SPbGPU. Part 1]. St.Petersburg: SPbGPU Publ. 2014. S. 19–20 (rus).
5. **Lyamkin D.I.** Sravnitel'naya otsenka plotnosti i stabilnosti khimicheskoy setki polietilenovoy izolyatsii kabelnykh izdeliy pri termomekhanicheskem vozdeystvii [Comparable assessment of density values and stability levels of chemical structure of polyethylene insulation]. *Cable-news.* № 3. 2010. S. 73–77 (rus).
6. **GOST R MEK 60811-1-2011.** Obshchiye metody ispytaniy materialov izolyatsii i obolochek elektricheskikh i opticheskikh kabeley. Izmereniye tolshchiny i naruzhnykh razmerov. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv [State standard specification. General test methods for insulating and sheathing materials of electric and optical cables. Measurements of thickness and overall dimensions. Tests for determining the mechanical properties] Moscow: Standartinform, 2013. 14 s. (rus)
7. **GOST R MEK 60811-1-2-2011.** Obshchiye metody ispytaniy materialov izolyatsii i obolochek elektricheskikh i opticheskikh kabeley. Chast 1-2. Metody obshchego primeneniya. Metody teplovogo stareniya [Common test methods for insulating and sheathing materials of electric and optical cables. Part 1-2. Methods of general applications. Thermal ageing methods] Moscow: Standartinform, 2012. 12 s. (rus)
8. Tinius Olsen H5KS, Available:<http://www.tiniusolsen.com/pdf/B140D.pdf> (Accessed 11.10.2014).
9. Operating Manual APT.LineTM M53. Available: <http://www.binder-world.com/de> (Accessed 15.10.2014).
10. **Kim V.S.** Issledovaniye vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov proizvodstva samonesushchikh izolirovannykh provodov na mekhanicheskiye svoystva izolyatsii iz sshitogo polietilena [Study of the influence of technological factors of self-supporting insulated wires manufacture on the mechanical properties of the cross-linked polyethylene insulation] *Naukovedeniye.* 2013. № 3. S. 1–7. (rus).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

СОЛОВЬЕВ Юрий Владимирович – генеральный директор ООО «Компания АЛСИБ». 197046 Санкт-Петербург, ул. Мичуринская, 12. E-mail: yury.solovyev@yahoo.com

SOLOVYEV Yurii V. – ALSIB Company Ltd.. 12, Michurinskaya St., Saint-Petersburg, 197046. E-mail: yury.solovyev@yahoo.com

НАЗАРЫЧЕВ Александр Николаевич – доктор технических наук профессор, ректор Петербургского энергетического института повышения квалификации. 196135, Санкт-Петербург, ул. Авиационная, 23. E-mail: nazarythev@mail.ru

NAZARYTHEV Aleksandr N. – Petersburg Power Engineering Institute of professional development. 23, Aviationsionnaya st., Saint-Petersburg, Russia, 196135. E-mail: nazarythev@mail.ru