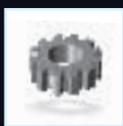


V E S P E L[®]

S

Семейство марок

Руководство
для инженеров-
конструкторов



DuPont[™] Vespel[®]
forward engineering



* Зарегистрированные торговые марки E.I. du Pont de Nemours and Company
Торговая марка The miracles of science[™] принадлежит E.I. du Pont de Nemours and Company

The miracles of science[™]

Рекомендации по конструированию из материала Vespe!®

Содержание

Введение	3	Втулки и подшипники	33
Общие сведения	3	Отличие подшипников из полиимида Vespe!® от всех прочих ...	33
Химический состав	3	Как выбрать материал для подшипников	33
Способы изготовления	3	Проектирование подшипников из полиимида Vespe!®	35
Свойства по различным направлениям	3	Смазка и другие факторы, учитываемые при проектировании подшипников	37
Руководство по ключевым спецификациям и потребностям	4	Подшипники со смазкой	40
Качество	4		
Полиимидные композиции и их свойства	5	Кольцевые уплотнители	43
Физические свойства	6	Почему полиимиды?	43
Влияние температуры	11	Глоссарий расчетных параметров	43
Сверхжесткий материал ST	12	Стандартное проектирование соединенных встык кольцевых уплотнителей, изготовленных прямым формованием	43
Кривые Напряжение-деформация	12	Другие соображения, учитываемые при проектировании	44
Ползучесть и релаксация напряжений	14	Расчетные допуски	45
Влияние влагопоглощения	16	Проектирование кольцевых уплотнителей в некоторых особых случаях	46
Термическое расширение	17		
Усталость и ударпрочность	18	Приложения	49
Электрические свойства	18	Размеры стандартных заготовок	49
Влияние химикатов	20	Допуски ISO	50
Другие свойства	22	Данные о безопасности материалов	52
Прямое формование	23	Описание таблиц и рисунков	48
Детали, изготовленные прямым формованием	23		
Допуски и общее руководство по промышленному проектированию	25		
Факторы, учитываемые при проектировании	26		
Детали, требующие последующей обработки после прямого формования	27		
Детали, изготовленные машинной обработкой	27		
Общие приемы машинной обработки	28		
Соединение деталей	31		
Комбинированное формование и нанесение покрытий	31		
Устойчивость к воздействию радиации	31		

Введение

Общие сведения

Благодаря появлению ряда инновационных разработок, сфера применения которых распространяется как на процесс изготовления и модернизацию продукции, так и на производственный метод, возможным стало возникновение целого семейства полиимидных изделий, которые предлагают инженерам-конструкторам практичные и экономически эффективные решения труднейших проблем проектирования устройств, работающих при высоких температурах.

Реализация изделий и профилей из полиимида VESPEL® SP осуществляется на рынке уже более 20 лет. Они специально приспособлены для работы в условиях, когда от механических деталей требуются термостойкость, особые электрические свойства, износостойкость и устойчивость к воздействию трения.

Чтобы добиться улучшения характеристик прочности и жесткости, в дополнение к продукции из полукристаллического полимера серии SP была разработана новая серия продукции из полиимида VESPEL® ST, основное отличие которого заключается в отсутствии кристаллической структуры.

Из этих полиимидных смол DuPont производит детали под маркой VESPEL® в строгом соответствии с техническими требованиями клиентов. Также можно заказать профили и стандартные заготовки для производства опытных образцов и небольших партий деталей методами машинной обработки.

Роль инженера-конструктора в условиях современных конкурентных рынков чрезвычайно важна как при разработке новых продуктов, так и при модернизации уже существующих. Как и все детали из пластика, детали из полиимида VESPEL® производятся с учетом универсальных требований к дизайну и по тем же самым законам физики, применимым к материалам. Поэтому цель данного руководства – помочь инженерам-конструкторам применять эти принципы при выборе, испытаниях и определении технических требований к деталям из полиимида VESPEL®.

Руководство содержит наиболее полные данные о физических свойствах и эксплуатационных характеристиках полиимидных смол SP, из которых изготавливаются детали под маркой VESPEL®. Отбор данных для руководства в некоторой степени основывался на результатах обсуждений с инженерами-конструкторами, работающими в компаниях, применяющих в своем производстве наши детали из полиимидов VESPEL®. Все данные получены в результате тщательных исследований физических свойств материалов в лабораториях DuPont в Вилмингтоне, штат Далавар. Несмотря на это, мы всегда рекомендуем проводить испытания конечного продукта.

Сегодня детали из полиимида VESPEL® производятся в США в г. Ньюарк, в Японии в г. Уцуномия и в Бельгии в г. Мехелен.

Химический состав

Полимер

VESPEL® представляет собой полиимид конденсационного типа, который производится из пиромеллитового диангидрида (PMDA) и 4,4'-диамин-дифенилэфира (ODA).

При температурах ниже температуры разложения, которая значительно превышает 400° C, никогда не происходит сколько-нибудь заметного перехода VESPEL® в стеклообразное или расплавленное состояние, что является основным функциональным свойством этого вещества. Таким образом, VESPEL® работает как термосет – терморезактивная пластмасса или реактопласт.

Полиимид SP

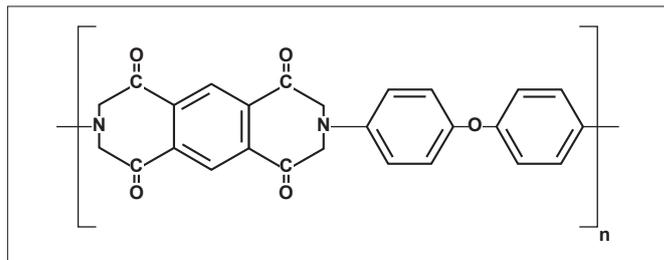


Рис. 1 Химическая формула полиимида VESPEL® SP

Кристаллическая структура новой полиимидной смолы, названной ST, является ее основным отличием от полиимидных смол SP, которые обычно содержат от 25 до 50% кристаллических структур.

Смолы ST либо обладают малой степенью кристалличности либо вовсе не обладают ею. Инфракрасные спектры, однако, показывают, что в отличие от аморфной смолы SP, которая имидирована на 40%, новая смола ST содержит до 100% имидов.

Способы изготовления

DuPont изготавливает высокоточные детали из полиимида VESPEL® несколькими основными способами. В каждом конкретном случае выбор способа изготовления зависит от целого ряда факторов – от требований к конечному применению, технических условий заказчика, геометрии деталей и экономических соображений.

Небольшие партии деталей, а также детали сложной формы и крупных размеров обычно изготавливаются механической обработкой из прутков, бляшек или труб. Таким образом, можно использовать все стандартные технологии обработки металлопроката и и устанавливать максимально точные допустимые толерантные пределы.

Если позволяет геометрия деталей, то крупные партии можно изготавливать прямым формованием, подобным применяемому в порошковой металлургии. Изготовление деталей прямым формованием обычно требует меньших финансовых затрат, нежели обработка на станках. Если прямое формование неприемлемо из-за особых требований допусков размеров или сложной формы деталей, то часто используется сочетание прямого формования с последующей обработкой на станках.

Свойства по различным направлениям

Для изделий из полиимида VESPEL®, как и вообще для большинства изделий из пластмассы, характерна анизотропия, или различие свойств в зависимости от направления силы, применявшейся при изготовлении изделия. Например, такие свойства, как предел прочности на разрыв и относительное удлинение при разрыве, выше, а термическое расширение ниже в плоскости, перпендикулярной (⊥) к формирующей силе, чем в направлении, параллельном (||) этой силе.

Детали из полиимида VESPEL®, изготавливаемые путем механической обработки из заготовок, обычно не обладают свойством анизотропии.

Типичные свойства деталей, изготавливаемых путем механической обработки, были получены при испытаниях заготовок из изотропного материала. Этот материал формуется таким образом, что его свойства одинаковы по всем направлениям.

Детали, изготовленные прямым формованием, получены под давлением в одном направлении, что приводит к некоторой анизотропии, или различию свойств по разным направлениям. С добавлением наполнителей эти различия возрастают. Наибольшая прочность и относительное удлинение при разрыве, а также наименьшее термическое расширение наблюдаются для большинства деталей в направлении, перпендикулярном формующей силе. Представленные в настоящем руководстве данные о деталях, изготовленных прямым формованием, были получены именно в перпендикулярном направлении, за исключением характеристик сжатия и теплопроводности.

При испытаниях деталей из полиимида VESPEL® в условиях их конечного применения очень важно использовать такой материал (профили или стандартные заготовки, полученные прямым формованием), который будет затем производиться в промышленных масштабах. Поэтому DuPont предлагает стандартные заготовки, полученные прямым формованием, для изготовления опытных образцов.

Руководство по ключевым спецификациям и потребностям

Обычно при появлении новых сфер применения высокоточных деталей из полиимида VESPEL® за несколькими другими основными этапами следует определение технических условий. Необходимый первый этап - определение требований к конечному продукту.

За первым этапом обычно следуют подготовка предварительной проектной документации, изготовление опытных образцов и их испытания. Лишь после их успешного завершения следует рассматривать возможность написания технических условий.

Технические условия формулируются с целью, чтобы избежать значительных отклонений в характеристиках изделий, в результате которых были бы нарушены эксплуатационные характеристики и экономические требования, установленные на предыдущих этапах. Поэтому технические условия – плод совместной работы поставщика и конечного пользователя – пишутся в виде перечня требований, которым должны удовлетворять готовые детали при приемке.

Богатство способов изготовления высокоточных деталей из полиимида VESPEL® позволяет гибко реагировать на потребности клиентов.

Инженер-конструктор всегда должен иметь в виду, что проектирование деталей из пластмассы обычно требует больших допусков по размерам, чем для деталей из металла.

Данное руководство содержит типичные значения свойств деталей, изготовленных прямым формованием и машинной обработкой. Поскольку опубликованные значения были усреднены, мы не рекомендуем формулировать технические условия на основе их максимальных значений.

Качество

Детали из полиимида VESPEL® изготавливаются DuPont на заказ и удовлетворяют тем строгим требованиям к качеству, которые предъявляют самые требовательные в мире производители оригинального оборудования – от детали к детали и от заказа к заказу. Наша система статистического контроля производственных процессов дает возможность постоянно производить высококачественную продукцию с меньшими затратами по сравнению с обычными системами управления производством. Точность нашей системы статистического контроля даже позволяет некоторым клиентам отказаться от собственной системы проверки поставляемых деталей и существенно снизить свои расходы.

Процедуры контроля качества включают как измерения с помощью лазера, так и компьютерное видео-сканирование допусков размеров и однородности. Также мы применяем ультразвуковые испытания целостности материала.

Поскольку все данные о производстве заказа сохраняются, если потребуется, весь процесс производства готовой продукции можно будет отследить вплоть до партии поставки смолы.

Все предприятия по производству изделий из полиимида VESPEL® сертифицированы в соответствии с ISO 9001 и QS 9000.

В качестве примера того, как мы соблюдаем самые высокие стандарты качества, можно упомянуть, что предприятие DuPont по производству полиимида VESPEL® в г. Мехелен получило две награды Ford Q1, звезду Chrysler Penta и статус приоритетного поставщика компании Rolls Royce Aero Engines.

По всему миру компания DuPont применяет систему тотального управления качеством, чтобы осуществлять контроль качества по всем аспектам деятельности. Для деталей это означает обеспечение стандартов качества на всех стадиях производства – от поступающего сырья до готовой продукции, вовремя поставляемой клиенту.

Качественная продукция производится DuPont по принципу «избежать ошибок», а не «исключить задачи». Мы постоянно совершенствуем качество, следуя руководящим принципам Ford Q1 и VDA (Verband der Automobilindustrie E.V.), а также других наших клиентов. При этом мы используем такие инструменты, как

FMEA – анализ ошибок и отказов;

SPC – статистический контроль производственных процессов;

RMI – проверка сырья;

PITA – администрирование производства и инспекции инструментов.

Все процедуры обеспечения качества перечислены в Руководстве по контролю качества, которое постоянно обновляется.

Полиимидные композиции и их свойства

Высокоточные детали из полиимида VESPEL® поставляются как в виде , так и в виде специально изготовленных полиимидных композиций. Некоторые композиции содержат наполнители для улучшения одного или двух эксплуатационных свойств полиимидных смол.

Например, для снижения трения и износа добавляется графит, а для снижения статического трения или стирания при трении о мягкие металлы добавляется фторсодержащий полимер TEFLON®. Краткое описание полиимидных композиций от DuPont приводится в таблице ниже.

VESPEL® SP: требования к применению

Марка	Стандартные области применения	Полиимидные композиции
SP1	Механические и электротехнические детали при повышенных температурах. Седла клапанов, уплотнение, изоляция.	Ненаполненная смола. Максимальная прочность и относительное удлинение: минимальный модуль и теплопроводность: оптимальные электрические свойства
SP21	Для изделий с низким коэффициентом трения и уровнем износа, предполагающих наличие или отсутствие смазки. Седла клапанов, уплотнения, подшипники, втулки и уплотнительные кольца.	Массовая доля графита – 15%. Повышенная износостойкость, продолжительная температурная стабильность.
SP22	Детали, для которых низкий уровень теплового расширения более важен, чем прочность (которая несколько снижена). Подшипники (втулки, подкладные шайбы и пр.)	Массовая доля графита – 40%. Обеспечивает низкий коэффициент теплового расширения. Максимальное сопротивление ползучести.
SP211	Проекты с низким коэффициентом трения и уровнем износа, эксплуатация при умеренных температурах и значениях давление-скорость. Подшипники (втулки, шайбы и пр.)	Массовая доля графита – 15% и фторпласта TEFLON® - 10%. Наименьшее статическое трение.
SP3	Для условий, предполагающих наличие трения и износа в среде инертных газов или вакуума. Подшипники, поршневые кольца и уплотнения.	Массовая доля дисульфида молибдена (MoS ₂) – 15%. Наилучшая износостойкость в сухой среде.
SP211	Проекты, требующие низкого уровня износа в условиях отсутствия смазки, в контакте с мягкими металлами, такими как алюминий, медь, бронза. Подшипники (втулки, шайбы и пр.)	Массовая доля графита – 40% и фторпласта TEFLON® - 10%. Наименьший уровень износа в сухой среде и в контакте с мягкими металлами.
SP262	Детали, для которых низкий уровень теплового расширения и низкий коэффициент трения более важны, чем прочность. Подшипники.	Массовая доля графита – 57% и углеродных волокон 5%. Минимальный коэффициент теплового расширения и наиболее высокая теплопроводность.

VEspeL® ST решает самые сложные задачи – марки ST демонстрируют наивысшую жесткость, прочность и термостойкость

Марка	Стандартные области применения	Полиимидные композиции
ST2010	Для изделий с низким коэффициентом трения и уровнем износа, предполагающих наличие или отсутствие смазки. Седла клапанов, уплотнения, подшипники, втулки и уплотнительные кольца.	Великолепная износостойкость и низкая истираемость дополняются высокой твердостью, прочностью и хорошими изоляционными качествами. Содержит 10% графита. Наивысший уровень относительного удлинения.
ST2030	Детали, для которых низкий уровень теплового расширения более важен, чем прочность (которая несколько снижена). Подшипники (втулки, подкладные шайбы и пр.)	Пониженный коэффициент теплового расширения, более низкий уровень удлинения, чем у ST2010. Массовая доля графита – 30%. Наивысшая стойкость к окислению и термоустойчивость.

Мы надеемся, что эта брошюра стимулирует новые конструкторские идеи, и материал VESPEL® сможет помочь Вам решить стоящие перед Вами задачи промышленного проектирования. За дополнительной информацией и разъяснениями обращайтесь к Вашему местному представителю по маркетингу DuPont™ VESPEL®, прежде чем начать Ваш проект. Наш представитель будет рад проинформировать Вас о деталях, изготавливаемых прямым формованием, обсудить похожие области применения, помочь Вам приобрести материалы VESPEL® для испытаний и изготовления опытных образцов.

Физические свойства

Высокоточные формованные детали из полиимидных смол DuPont™ VESPEL® обладают уникальной комбинацией физических свойств, благодаря которым мир доступных в данный момент конструкционных пластиков становится еще более многогранным. К ним относятся функциональная работоспособность деталей в диапазоне температур от криогенных до 500°C для многих практических применений; возможность непрерывной работы при температуре окружающего воздуха до 300°C; экстремально высокие значения давления (до 12 МПа • м/с без смазки и даже более высокие значения со смазкой); высокая диэлектрическая прочность; превосходная механическая прочность и устойчивость к растворителям; низкий уровень газовой выделенности и высокая устойчивость к ионизирующему излучению. В таблицах 1 – 4 приведена краткая сводка типовых физических свойств деталей из полиимидов VESPEL®. Последующие графики и таблицы содержат более подробную информацию.

Таблица 1 Перечень основных характеристик стандартных полиимидных смол серии SP

Свойство	Темп. °С	Метод ASTM	Ед.	SP1		SP21		SP22		SP211		SP3
				М	DF	М	DF	М	DF	М	DF	М
Предел прочности на разрыв	23	D1708 или E8 [†]	МПа	86,2	72,4	65,5	62,0	51,7	48,3	44,8	51,7	58,5
	260			41,4	36,5	37,9	30,3	23,4	26,2	24,1	24,1	
Относительное удлинение при разрыве	23	D1708 или E8 [†]	%	7,5	7,5	4,5	5,5	3,0	2,5	3,5	5,5	4,0
	260			7,0	6,0	3,0	5,2	2,0	2,0	3,0	5,3	
Предел прочности при статическом изгибе	23	D790	МПа	110,3	82,7	110,3	82,7	89,6	62,1	68,9	68,9	75,8
	260			62,1	44,8	62,0	48,3	44,8	37,9	34,5	34,5	39,9
Модуль изгиба	23	D790	МПа	3102	2482	3792	3171	4826	4826	3102	2758	3275
	260			1724	1448	2551	1792	2758	2758	1379	1379	1862
Сжимающее напряжение при 1% отн. деформации при 10% отн. деформации при 0,1% компенсации	23	D695	МПа	24,8	24,1*	29,0	22,8	31,7	24,1	20,7	14,5*	34,5
				133,1	112,4*	133,1	104,8*	112,4	93,8*	102,0	75,8*	127,6
				51,0	33,1*	45,5	33,8*	41,4	25,5*	37,2	27,6*	
Модуль сжатия	23	D695	МПа	2413	2413*	2895	2275*	3275	2654*	2068	1379*	2413
Предел усталости, при осевых нагрузках После 10 ³ циклов	23		МПа	55,8		46,2						
	260			26,2	22,8							
После 10 ⁷ циклов	23		МПа	42,1		32,4						
	260			16,5	16,5							
Предел усталости на изгиб После 10 ³ циклов	23		МПа	65,5		65,5						
	23			44,8	44,8							
После 10 ⁷ циклов	23											
Прочность на сдвиг	23	D732	МПа	89,6		77,2						
Ударная вязкость по Изоду, с надрезом	23	D256	Дж/м	42,7		42,7						21,3
Ударная вязкость по Изоду, без надреза	23	D256	Дж/м	747		320						112
Коэффициент Пуассона	23			0,41		0,41						
Скорость изнашивания [‡]			м/сх10 ⁻¹⁰	17-85	17-85	6,3	6,3	4,2	4,2	4,9	4,9	17-23
Коэффициент трения** PV = 0,875 МПа • м/с				0,29	0,29	0,24	0,24	0,30	0,30	0,12	0,12	0,25
				-	-	0,12	0,12	0,09	0,09	0,08	0,08	0,17
В вакууме												0,03
Трение покоя, в среде воздуха				0,35	-	0,30	-	0,27	-	0,20	-	-
Коэффициент линейного теплового расширения	от 23 до 260	D696	мкм/м/°С	54	50	49	41	38	27	54	41	52
	от -62 до +23				45	34						
Теплопроводность	40		Вт/м • °С	0,35	0,29*	0,87	0,46*	1,73	0,89*	0,76	0,42*	0,47
Теплоемкость			Дж/кг/°С	1130								
Деформация под нагрузкой 14 МПа	50	D621	%	0,14	0,20	0,10	0,17	0,08	0,14	0,13	0,29	0,12
Теплодеформационная стойкость под нагрузкой 2 МПа		D648	°С	~360		~360						

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

ИЗНОС И ТРЕНИЕ

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА

Таблица 2 Перечень основных характеристик стандартных полиимидных смол серии SP

Свойство	Темп. °С	Метод ASTM	Ед.	SP1		SP21		SP22		SP211		SP3
				M	DF	M	DF	M	DF	M	DF	M
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	Диэлектрическая постоянная	23	D150									
	при 102 Гц			3,62		13,53						
	при 104 Гц			3,64		13,28						
	при 106 Гц			3,55		13,41						
	Коэффициент затухания	23	D150									
	при 102 Гц			0,0018		0,0053						
при 104 Гц			0,0036		0,0067							
при 106 Гц			0,0034		0,0106							
Кратковременная диэлектрическая прочность, на образце толщиной 2 мм		D149	МВ/м	22		9,84						
Объемное удельное сопротивление	23	D257	Ω·м	10 ¹⁴ -10 ¹⁵		10 ¹² -10 ¹³						
Поверхностное удельное сопротивление	23	D257	Ω									
ДРУГИЕ СВОЙСТВА	Водопоглощение		D570	%								
	24 ч	23			0,24	-	0,19	-	0,14		0,21	0,23
	48 ч	50			0,72	-	0,57	-	0,42		0,49	0,65
	равновесное, при 50% отн. влажности				1,0-1,3	1,0-1,3	0,8-1,1	0,8-1,1	-		-	-
	Плотность		D792		1,43	1,34	1,51	1,42	1,65	1,56	1,55	1,46
Кислородный индекс		D2863	%	53		49						

† Механически обработанные образцы для испытаний на растяжение изготовлены по D1708, а образцы, изготовленные методом прямого формования, выполнены согласно пункту E-8 (стандартный валик для продукции порошковой металлургии); образцы испытывались по D638.

‡ Без смазки, в среде воздуха (PV 0,875 МПа • м/с)

* Свойства изделий прямого формования (DF), отмеченные звездочкой, измерялись параллельно направлению формования, все остальные свойства изделий прямого формования измерялись перпендикулярно направлению формования. Свойства изделий механической обработки (M) не зависят от направления.

** Стационарный режим, без смазки, в среде воздуха.

ASTM - Американское общество испытания материалов;

M - механическая обработка; DF - прямое формование.

Таблица 3 Предварительные характеристики новых полиимидных смол серии SP

	Свойство	Темп. °C	Метод ASTM	Ед.	SP221	SP262
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	Предел прочности на разрыв	23 260	D638 (E8)	МПа	38,6	37,9 19,3
	Деформация при разрыве	23 260	D638 (E8)	%	3,5	1 0,7
	Предел прочности при статическом изгибе	23 260	D790	МПа	55,1 31	
	Модуль изгиба	23 260	D790	МПа	3445 2205	
	Модуль растяжения	23 260	D638 (E8)	МПа		8410 3720
	Сжимающее напряжение		D695	МПа		
	При разрыве	23			111,7	100
	При разрыве	260			57	59
	при 1% отн. деформации	23			14,5	40
	при 1% отн. деформации	260			7,6	21,4
ИЗНОС И ТРЕНИЕ	при 10% отн. деформации	23			78,6	
	при 10% отн. деформации	260			46,5	
	Модуль упругости при сжатии	23 260	D695	МПа	1412 790	2860 1790
	Плотность		D732		1,6	1,74
	Предел соотношения давление - скорость			МПа • м/с	10,5	10,5
	Коэффициент трения					
	при PV = 0,875 МПа • м/с					0,10-0,14
	при PV = 3,5 МПа • м/с					0,05-0,08
	Коэффициент износа			мм ³ / Нмх10 ⁻⁶		
	при PV = 0,875 МПа • м/с					0,44
при PV = 3,5 МПа • м/с					0,66	
ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА	Износ и трение по 6061 ковкий алюминий		Коэффициент трения Скорость износа VESPEL®/металл	мм/с 10 ⁻⁶	0,21 2,3/0	
	при PV = 0,875 МПа • м/с					
	при PV = 0,875 МПа • м/с					
	Износ и трение по ADC 12 литьевой алюминий		Коэффициент трения Скорость износа VESPEL®/металл	мм/с 10 ⁻⁶	0,15 1,2/0	
	при PV = 0,5 МПа • м/с					
	при PV = 0,5 МПа • м/с					
	при PV = 4,7 МПа • м/с		Коэффициент трения Скорость износа VESPEL®/металл	мм/с 10 ⁻⁶	0,12 3,7/0,3	
	при PV = 4,7 МПа • м/с					
ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА	Коэффициент линейного теплового расширения		D696	мкм/м/°C		
	перпендикулярный	23-300			29	13,1
	параллельный	23-300				48,9
	Теплопроводность	23 200		Вт/м • К		2,46 1,98
ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА	Теплоемкость	23 40		Дж/кг/К		792 837

Таблица 4 Типичные характеристики деталей, изготовленных прямым формованием из полиимида VESPEL® серии ST

Свойство	Темп. °С	Метод ASTM	Ед.	ST2010	ST2030	
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	Предел прочности на разрыв	D638	МПа	23	68	57
				150	49	
				260	32	
				300	26	
	Деформация при разрыве	D638	%	23	10,0	4,9
				150	10,0	
				260	9,8	
				300	9,7	
	Модуль растяжения	23	D638	МПа	2758	3930
	Пропущено Izod Notched Impact Strength					
	Сжимающее напряжение при 1% отн. деформации при 10% отн. деформации при разрыве	23	D695	МПа	15	
					82	
269					155	
Модуль сжатия	23	D695	МПа	1827	1207	
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	Диэлектрическая прочность	23	D149	кВ/мм	10,4	
	Диэлектрическая постоянная при 100 Гц при 10 кГц при 1 МГц	23	D150		4,8	300
					4,78	110
					4,70	40,6
	Коэффициент затухания при 100 Гц при 10 кГц при 1 МГц	23	D150		0,0014	6,90
					0,0023	0,65
					0,0075	0,30
Объёмное удельное сопротивление	23	D257	Ом·см	$3,2 \times 10^{16}$	$4,8 \times 10^7$	
Поверхностное удельное сопротивление	23	D257	Ом	$2,0 \times 10^{16}$	$2,6 \times 10^6$	
Теплопроводность	23	F433	[Вт·см/см ² ·°С] × 10 ⁻³	5,0	9,7	
РАЗЛИЧНЫЕ СВОЙСТВА	Коэффициент линейного теплового расширения	23-260	D696	мкм/м/°С	48	32
	Водопоглощение, изменение веса в % 24 ч. 48 ч.	23	D570		1,3	0,5
					3,1	1,3
	Деформация под нагрузкой 14 МПа	23 50	D621	%	0,18	
					0,38	
Плотность	23	D272		1,38	1,44	

Примечание: типовых заготовок из полиимида серии ST пока нет в наличии

Влияние температуры

Поскольку полиимиды серий SP и ST не имеют температуры плавления или стеклования (T_g) и обычными методами невозможно измерить точку их перехода в размягченное состояние, то прочность и модули упругости этих материалов снижаются с температурой почти по линейному закону. Это отличает их от обычных конструкционных термопластиков, которые обнаруживают резкое снижение указанных выше механических свойств при приближении к температуре T_g . На рис. 2-5 показаны типичные кривые изменения предела прочности на разрыв

и модулей упругости с температурой для деталей, полученных прямым формованием и машинной обработкой.

Верхний предел температур, при которых можно использовать изделия из полиимидов серий ST и SP, определяется только их скоростями разложения, а не приближением к точке размягчения, где они должны потерять несущую способность. Такие детали и комплектующие могут постоянно использоваться в воздушной среде при температурах до 300°C, а в течение коротких промежутков времени при температурах до 500°C.

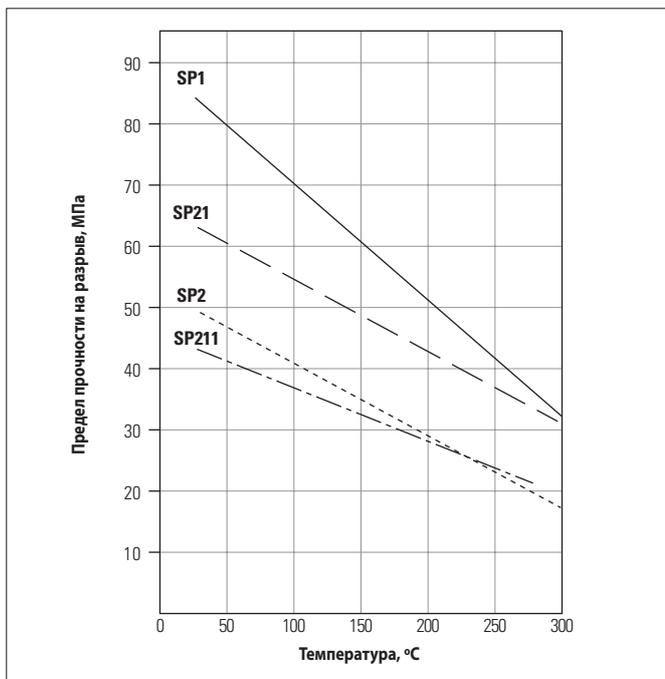


Рис. 2 Заготовки и профили из полиимида SP. Типичный ход зависимости предела прочности на разрыв от температуры, ASTM D1708

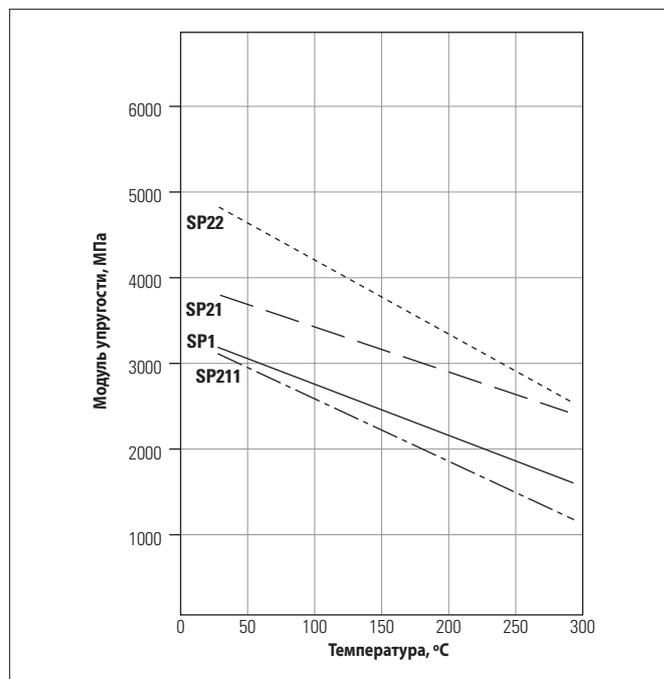


Рис. 4 Заготовки и профили из полиимида SP. Типичный ход зависимости модуля упругости от температуры, ASTM D740

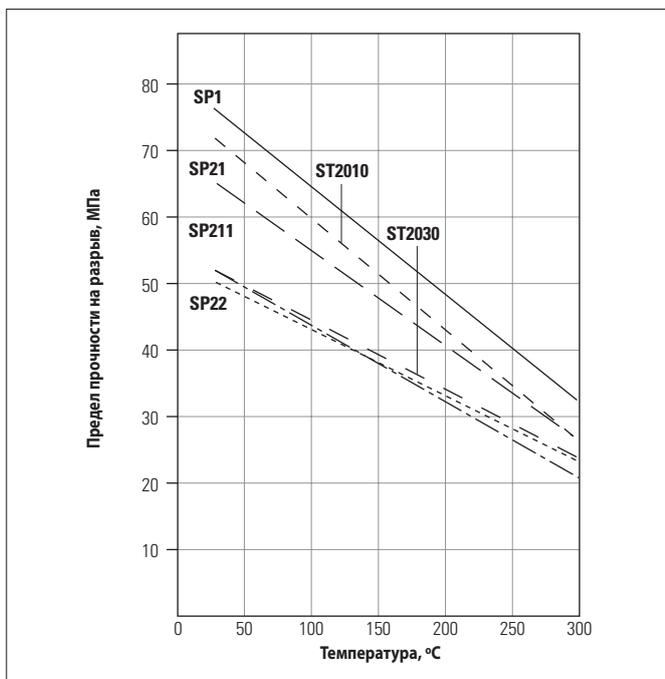


Рис. 3 Детали из полиимидов серий SP и ST, изготовленные прямым формованием. Типичный ход зависимости предела прочности на разрыв от температуры, ASTM E8

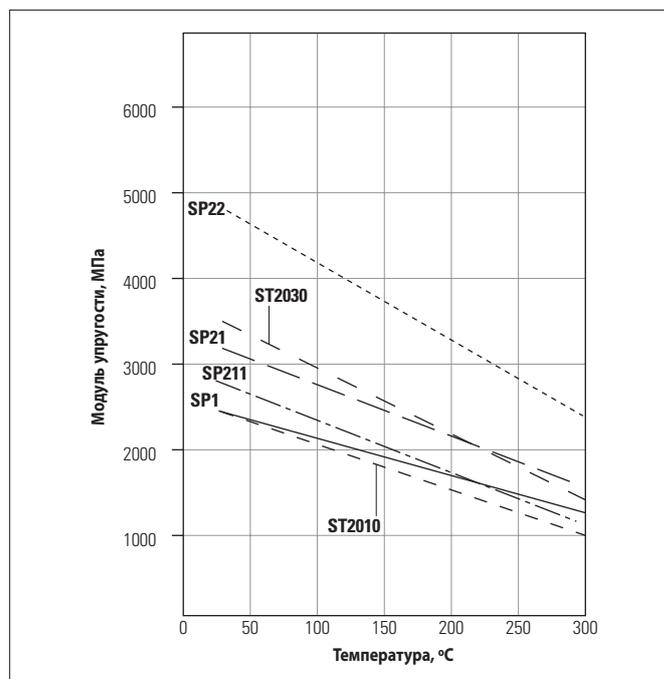


Рис. 5 Детали из полиимидов серий SP и ST, изготовленные прямым формованием. Типичный ход зависимости модуля упругости (модуль изгиба) от температуры, ASTM D790

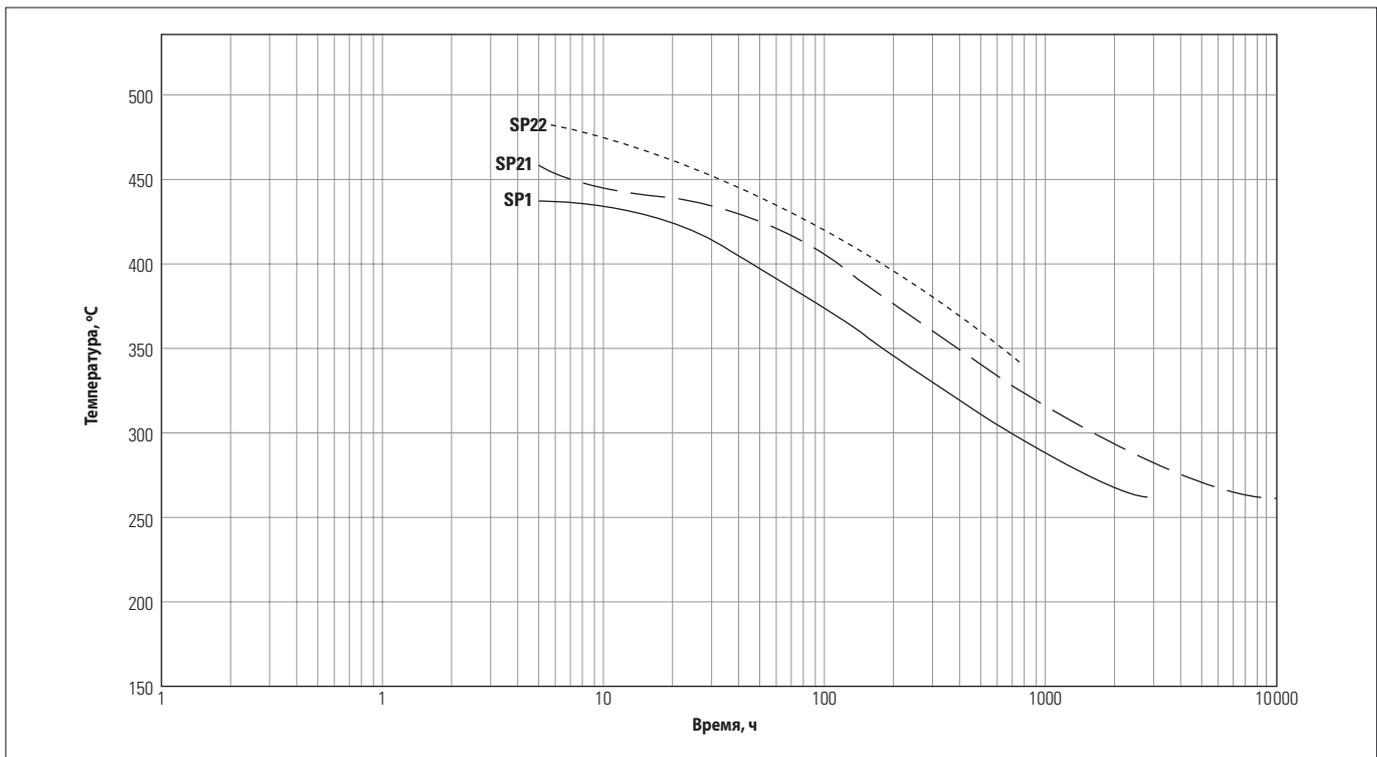


Рис. 6 Воздействие воздуха на полиимид серии SP при повышенных температурах. Приблизительный промежуток времени до 50%-ного снижения предела прочности на разрыв в зависимости от температуры.

Рис. 6 иллюстрирует пригодность полиимидов при высоких температурах, показывая промежуток времени, необходимый для снижения первоначального предела прочности материала на разрыв на 50%. Например, после 100 часов непрерывного пребывания образца из полиимиды марки SP1 в воздушной среде при температуре 370°C он сохранит половину своей первоначальной прочности. Полиимиды марок SP21 и SP22 обладают большей физической стабильностью, лучше сохраняют свои свойства со временем, что объясняется присутствием в них графитового наполнителя. Материал марки SP21 содержит 15% графита, и ему требуется 200 часов, чтобы при температуре 370°C его прочность снизилась наполовину, а материалу марки SP22 требуется для этого 350 часов, поскольку он содержит 40% графита.

Потеря прочностных свойств со временем при температурах до 400°C почти целиком объясняется разложением в процессе окисления. При температурах по крайней мере до 340°C детали из полиимидов серии SP практически не будут терять со временем своих прочностных свойств в инертной среде (например, в азоте или вакууме).

Естественно, что кривые на рис. 6 можно использовать лишь как руководство к действию, поскольку обычно полезное время жизни деталей из полиимиды VESPEL® гораздо больше. Это объясняется тем, что воздействие высоких температур обычно носит кратковременный, а не постоянный характер, а также тем, что, как правило, детали частично закрыты корпусом или держателем. Довольно редко детали из полиимидов VESPEL® в высокотемпературных применениях оказываются полностью открытыми для воздействия воздуха.

Сверхжесткий материал ST

• Повышенные температурные свойства

Поскольку детали из полиимиды VESPEL® ST имеют такие высокие первоначальные прочностные характеристики, они сохраняют функциональность в отношении прочности и жесткости при высоких температурах дольше, чем детали из полиимиды серии SP.

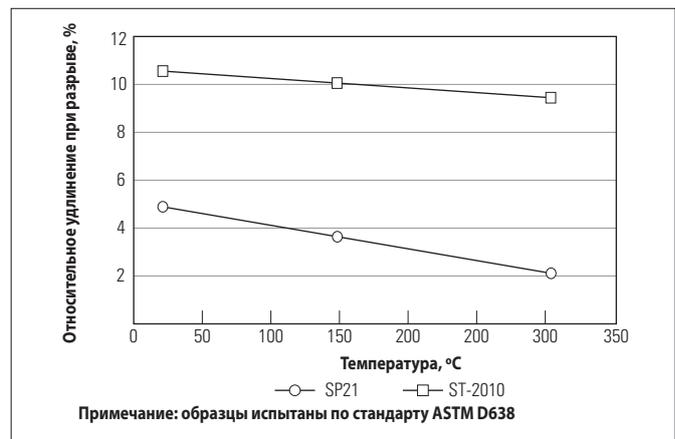


Рис. 7 Зависимость относительного удлинения при разрыве от температуры, материал SP21 в отличие от ST2010

• Превосходная жесткость

Детали из полиимиды VESPEL® ST имеют почти вдвое большее относительное удлинение при разрыве, чем детали из полиимидов предыдущей серии SP (рис. 7). Измеренная по Изоду ударная вязкость брусков с надрезом примерно на 50% больше (см. Таблицу 4).

• Повышенная прочность

Детали и комплектующие из полиимиды VESPEL® ST обладают более высокой прочностью, чем из полиимидов серии SP, как при растяжении, так и при сжатии, как показано на рис. 8 и 9.

Кривые Напряжение - деформация

Типичные кривые напряжений-деформаций при растяжении для деталей, полученных металлообработкой из полиимиды SP, показаны на рис. 10 и 11 (измерения проводились при температурах 23°C и 260°C). Аналогичные кривые для деталей, полученных прямым формованием, показаны на рис. 12 и 13. Кривые для деталей прямого формования и деталей, полученных машинной обработкой, изготовленных из одинаковой полиимидной композиции, отличаются, потому что детали прямого формования имеют меньшую плотность.

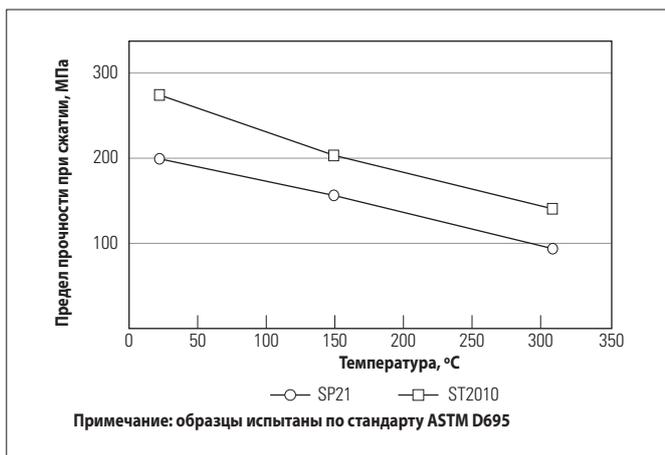


Рис. 8 Зависимость предела прочности при сжатии от температуры, SP21 в сравнении с ST2010

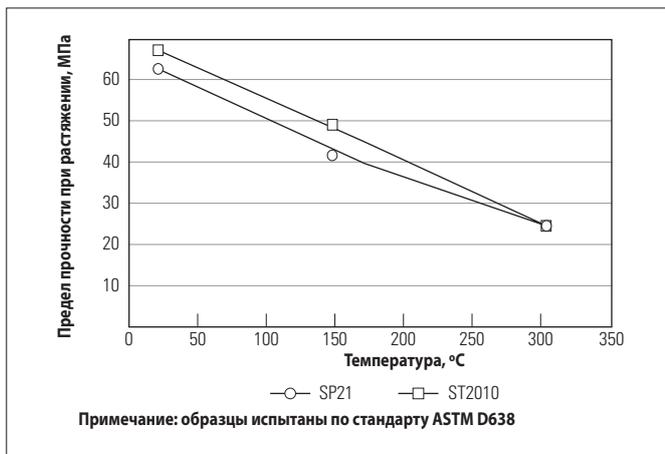


Рис. 9 Зависимость предела прочности при растяжении от температуры, SP21 в сравнении с ST2010

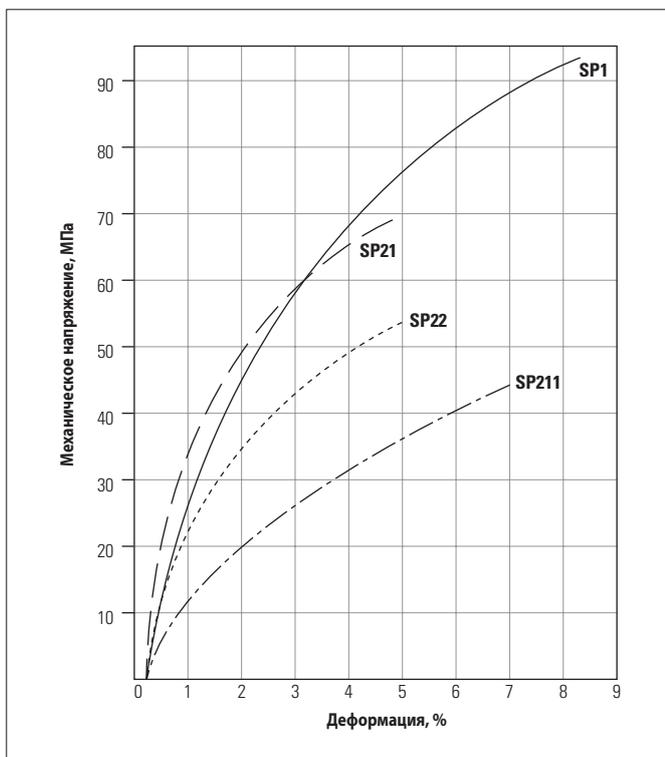


Рис. 10 Заготовки из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при температуре 23°C, ASTM D1708

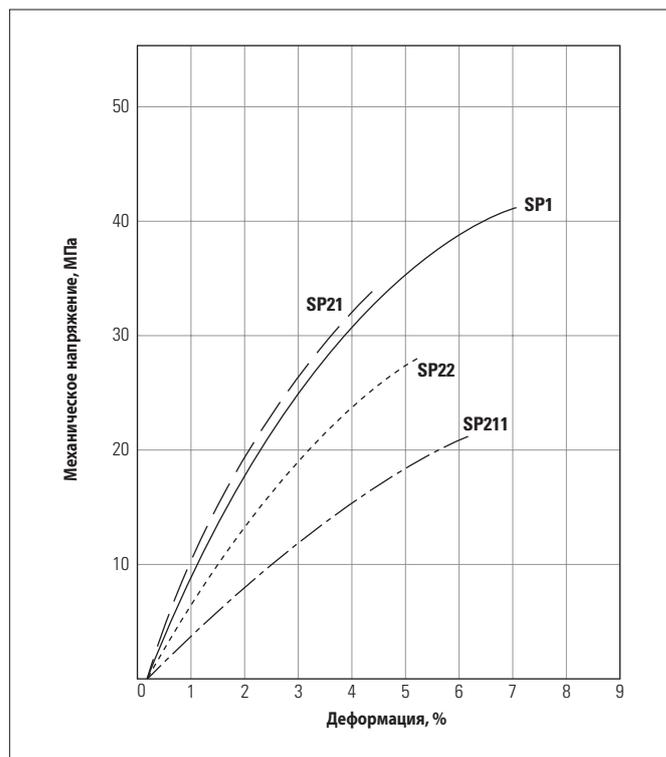


Рис. 11 Заготовки из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при температуре 260°C, ASTM D1708

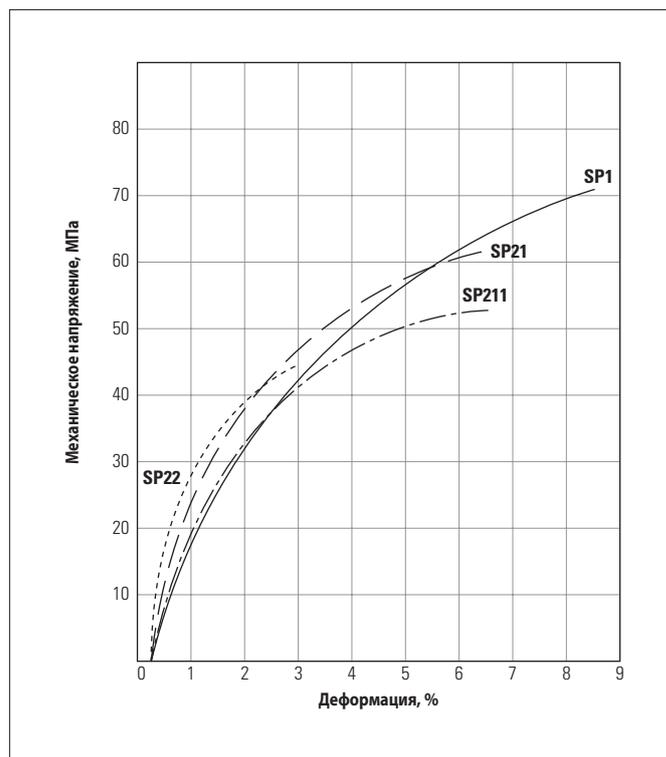


Рис. 12 Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при температуре 23°C, ASTM E8 (⊥ направлению формования)

На Рис. 14 – 16 представлены кривые напряжение - деформация при сжатии. Хотя детали из большинства полиимидных композиций серии SP можно сжимать до очень высоких относительных деформаций (>30%) без достижения предела прочности, на практике такая нагрузка очень сильно деформирует деталь.

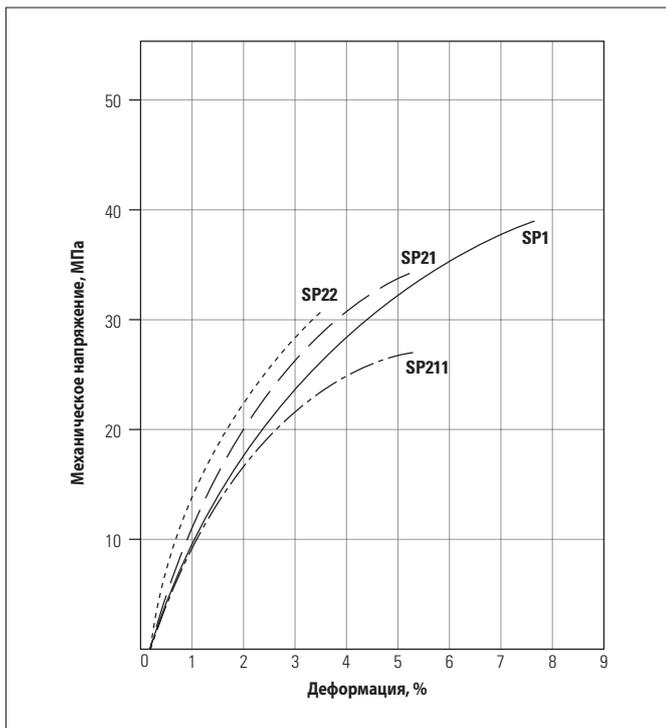


Рис. 13 Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при растяжении, при температуре 260°C, ASTM E8 (⊥ направлению формования)

Эти кривые показывают, до каких напряжений можно сжимать деталь, чтобы ее форма почти восстановилась после снятия нагрузки (остаточная деформация не превышала 5%) – при таких напряжениях предел упругости не будет исчерпан. Таблица 1 также содержит величины сжимающих напряжений, которые приводят к 0,1%-ной остаточной деформации детали. В отличие от термореактивных пластмасс, полиимиды можно сжимать до относительных деформаций в несколько процентов, и они будут практически восстанавливать свою форму (остаточная деформация не превысит 0,1%). Поэтому такие материалы хорошо использовать для формования различных уплотнителей.

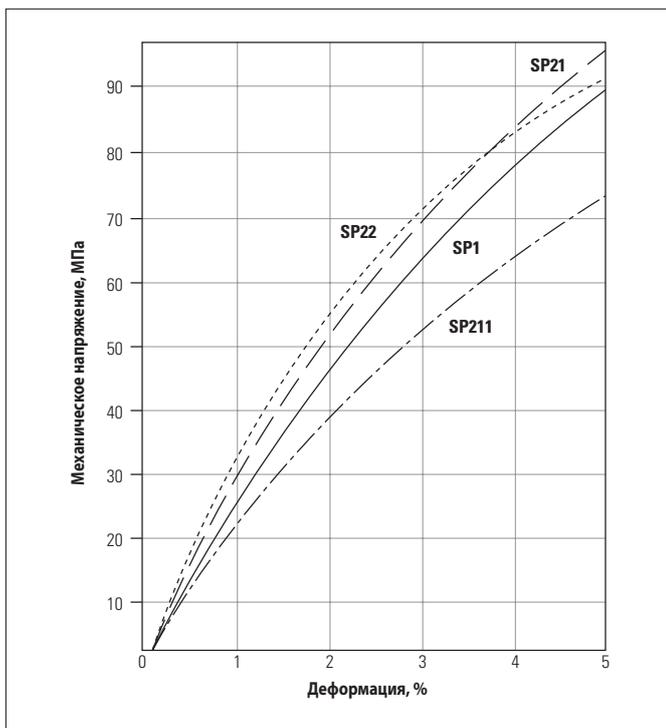


Рис. 14 Заготовки из полиимида SP при сжатии и при температуре 23°C, ASTM D695

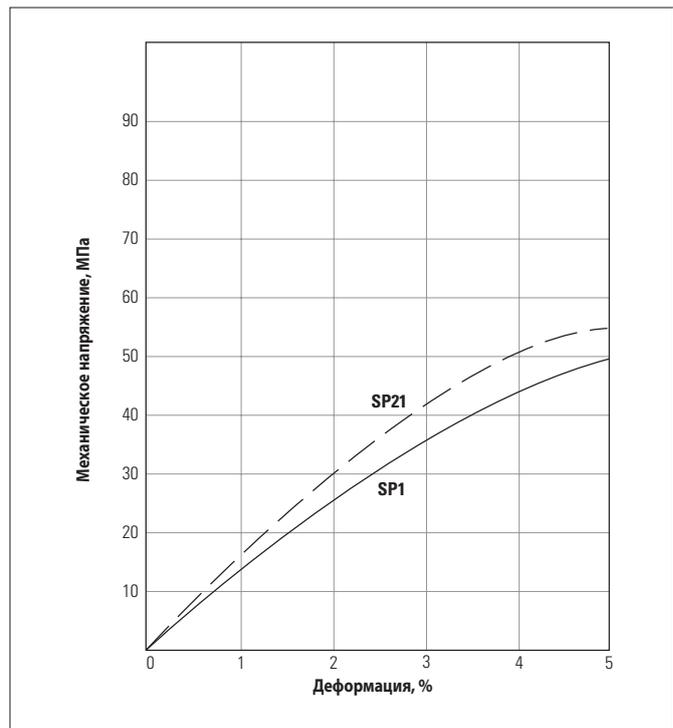


Рис. 15 Заготовки из полиимида SP при сжатии и при температуре 300°C, ASTM D695

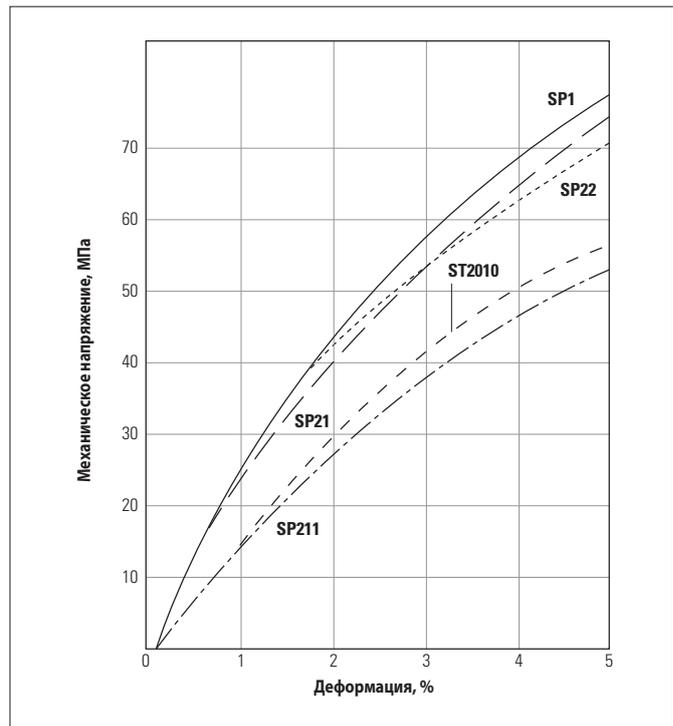


Рис. 16 Детали, изготовленные прямым формованием из полиимидов серии SP и ST. Типичные кривые напряжение – деформация при сжатии при температуре 23°C, ASTM D695 (∥ направлению формования)

Ползучесть и релаксация напряжений

Зависимая от времени деформация пластичного материала при постоянном напряжении называется ползучестью.

Ползучесть в данный момент времени определяется как разность между суммарной деформацией к этому моменту и первоначальной мгновенной деформацией в момент нагрузки.

Снижение со временем напряжения, необходимого для поддержания постоянной деформации, называется релаксацией напряжений.

На Рис. 17-19 показана зависимость суммарной деформации или растяжения от времени при постоянной нагрузке в 10,3 и 17,2 МПа для деталей, полученных машинной обработкой из материалов SP1, SP21 и SP22, при двух температурах.

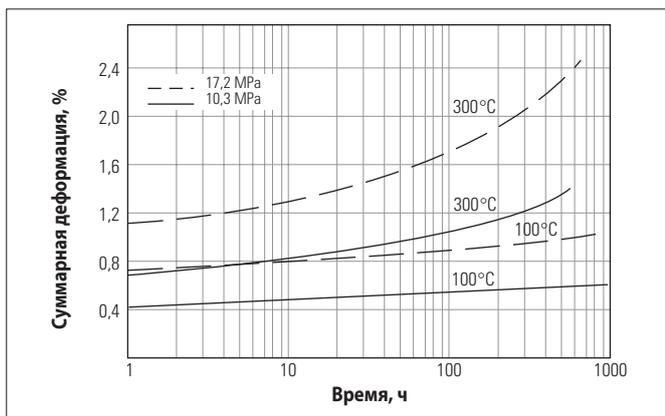


Рис. 17 Заготовки из полиимида SP1. Зависимость суммарной деформации под нагрузкой от времени

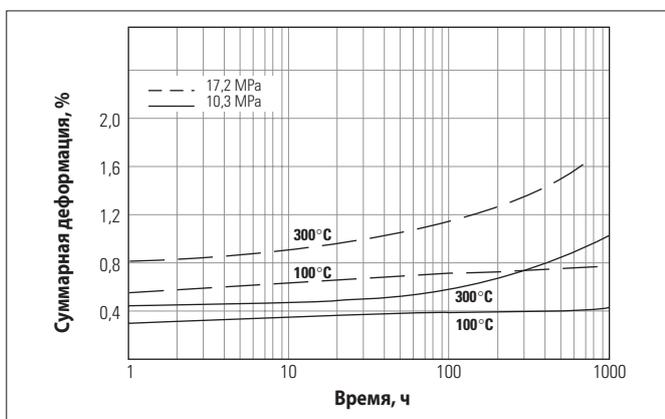


Рис. 18 Заготовки из полиимида SP21. Зависимость суммарной деформации под нагрузкой от времени

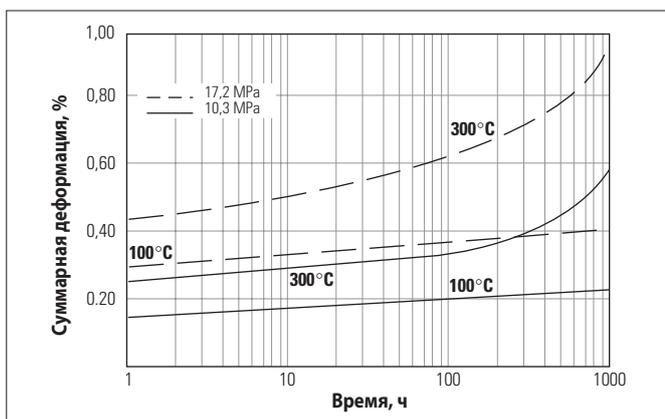


Рис. 19 Заготовки из полиимида SP22. Зависимость суммарной деформации под нагрузкой от времени

Поскольку полиимид SP не размягчается и устойчив к воздействию высоких температур, он может нести нагрузку при температурах, недоступных для большинства пластмасс, и при этом демонстрировать чрезвычайно низкую ползучесть. Сопротивление ползучести можно еще больше увеличить добавлением графитовых наполнителей, как это сделано в материалах SP21 и SP22. Например, рис. 19 показывает, что, после того как материал SP22 был подвергнут нагрузке в 17,2 МПа в течение 1000 часов при температуре 300°C, его ползучесть составила всего 0,5%.

Рис. 20-22 показывают изменение кажущегося модуля упругости со временем, при условиях, соответствующих рисункам 17-19. Подставляя зависящий от времени кажущийся модуль упругости в стандартные конструкционные расчеты, использующие модуль упругости, можно предсказывать эффекты ползучести и релаксации напряжений.

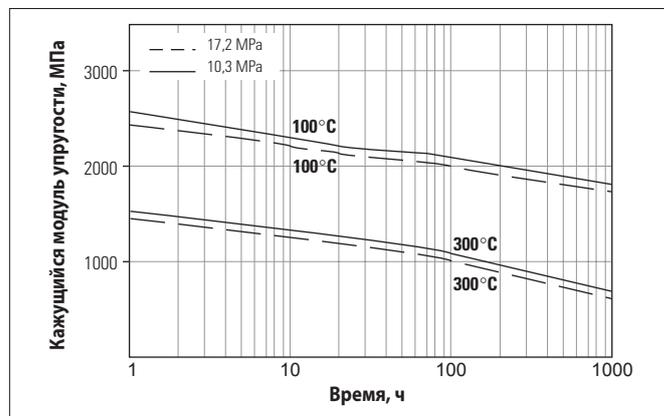


Рис. 20 Заготовки из полиимида SP1 Зависимость кажущегося модуля упругости под нагрузкой от времени

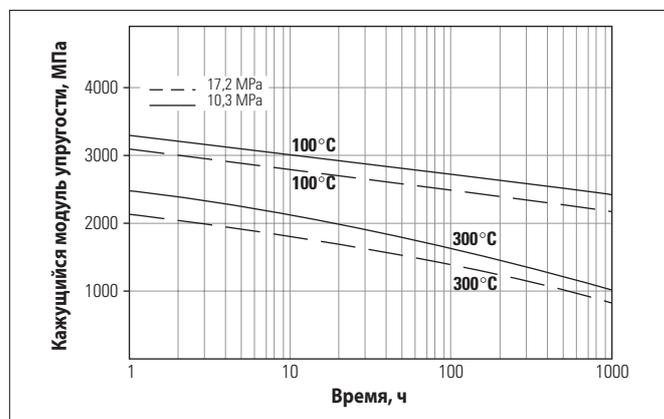


Рис. 21 Заготовки из полиимида SP21 Зависимость кажущегося модуля упругости под нагрузкой от времени

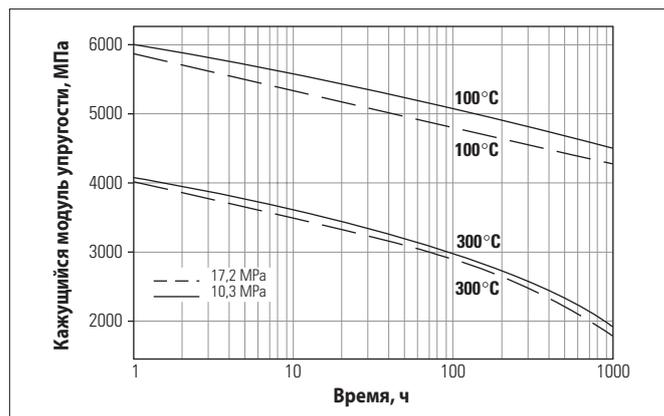


Рис. 22 Заготовки из полиимида SP22 Зависимость кажущегося модуля упругости под нагрузкой от времени

Влияние влагопоглощения

Рис. 23-25 показывают типичные темпы изменения размеров деталей из полиимида серии SP, изготовленных машинной обработкой и прямым формованием, в результате влагопоглощения.

Для достижения равновесного содержания влаги первоначально сухим материалом в контролируемых условиях требуется очень много времени, несколько тысяч часов. Поскольку влагопоглощение зависит от скорости диффузии, то чем меньше минимальный размер детали, тем сильнее относительное изменение ее размеров.

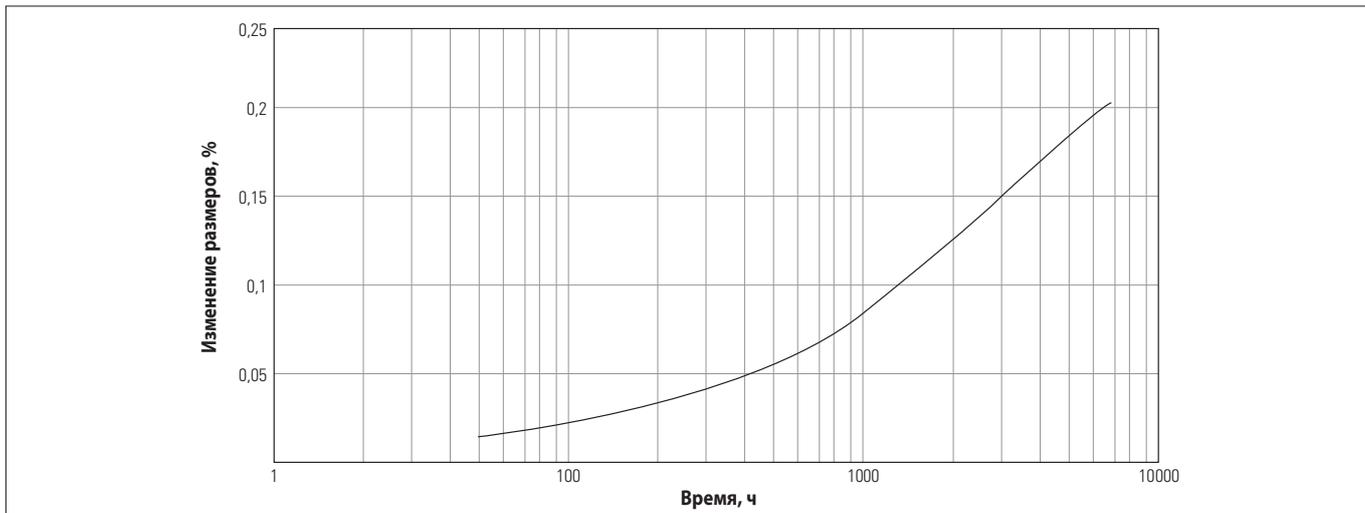


Рис. 23 Заготовки из полиимидов SP1 и SP21. Типичное изменение размеров со временем при 50% отн. влажности и температуре 23°C, толщина бляшек 3,2 мм

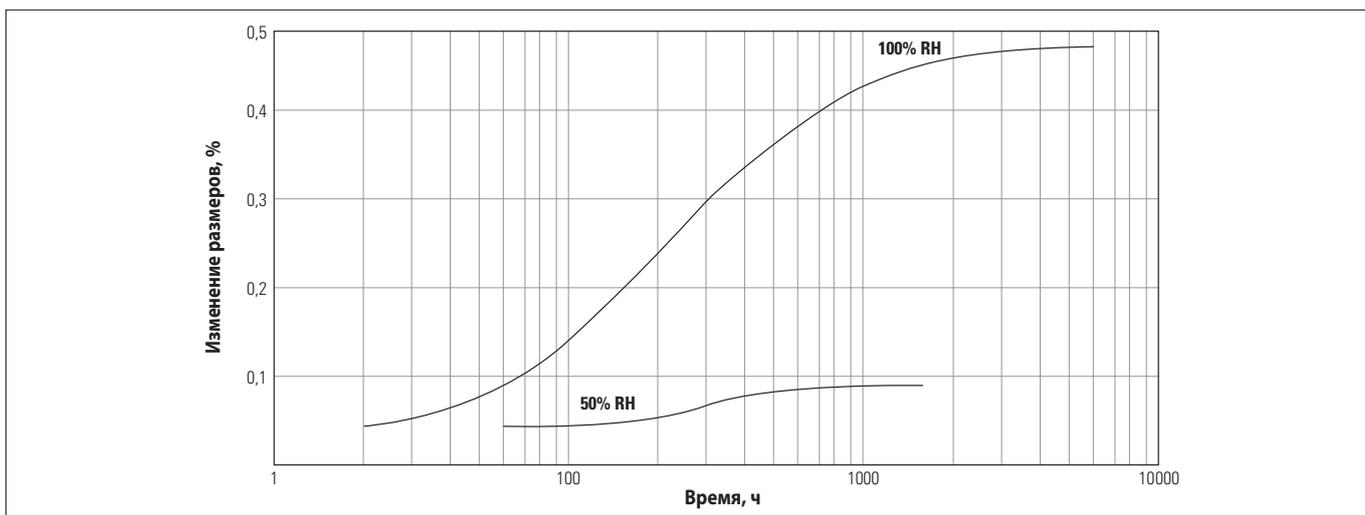


Рис. 24 Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP1. Типичное изменение размеров со временем при 50% и 100% отн. влажности и температуре 23°C, диски диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм

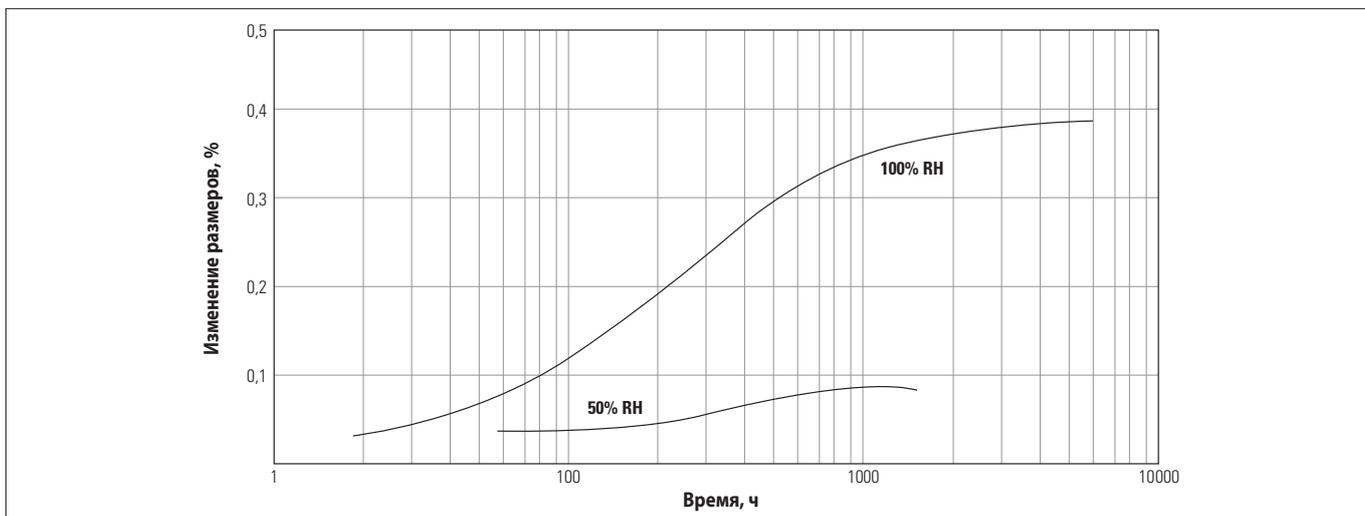


Рис. 25 Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP21. Типичное изменение размеров со временем при 50% и 100% отн. влажности и температуре 23°C, диски диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм

Рис. 26 и 27 показывают воздействие влажности воздуха при температуре 23°C на размеры деталей, изготовленных машинной обработкой и прямым формованием. При заданной относительной влажности воздуха деталь прекращает изменять свои размеры только после достижения равновесного состояния с окружающей средой. Если поместить первоначально сухую деталь в атмосферу 100%-ной влажности при 23°C, то после достижения равновесного состояния ее размеры изменятся не более чем на 0,5%, или 0,005 мм/мм.

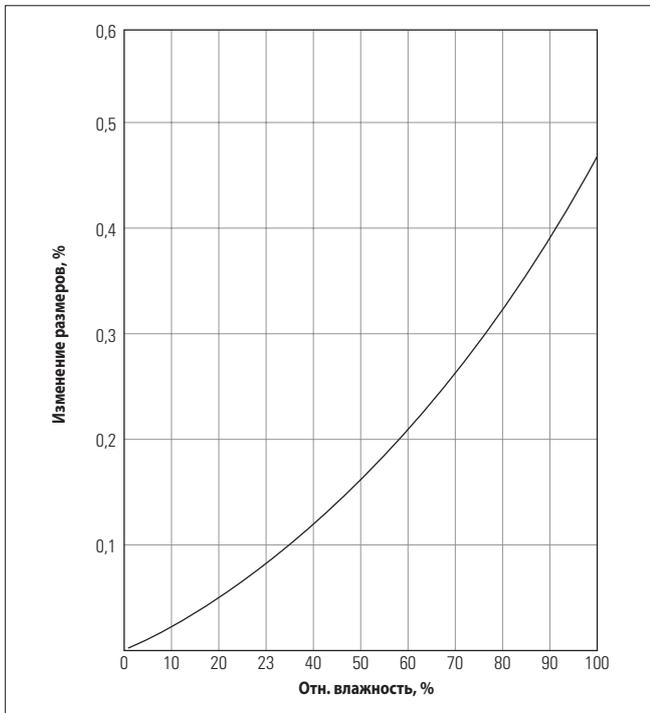


Рис. 26 Заготовки из полиимидов SP1 и SP21. Типичное изменение размеров при достижении равновесия со средой при заданной относительной влажности воздуха и температуре 23°C

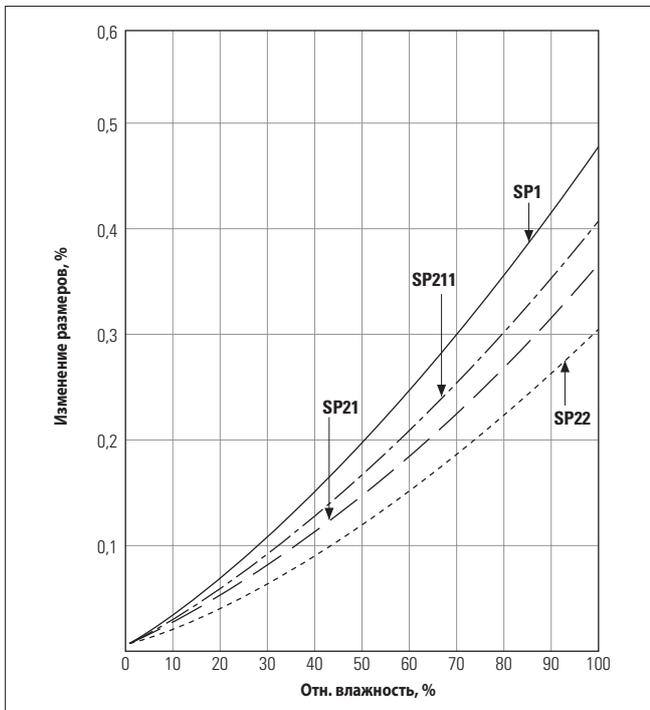


Рис. 27 Детали, изготовленные прямым формованием из полиимидов серии SP. Типичное изменение размеров при достижении равновесия со средой при заданной относительной влажности воздуха и температуре 23°C

Термическое расширение

Изменение линейных размеров деталей, изготовленных машинной обработкой из полиимида SP, в зависимости от изменения температуры показано на рис. 28, и для деталей, изготовленных прямым формованием, на рис. 29. На рис. 28 и 29 также показаны коэффициенты температурного расширения, усредненные в интервале температур от 23°C до 300°C. Коэффициенты, соответствующие другим диапазонам температуры, могут несколько отличаться от приведенных, но их можно вычислить из формы кривых, разделив относительное изменение размеров (в %) при нагревании в желаемом интервале температур на $100 \times \Delta T$, где ΔT - разность температур в градусах.

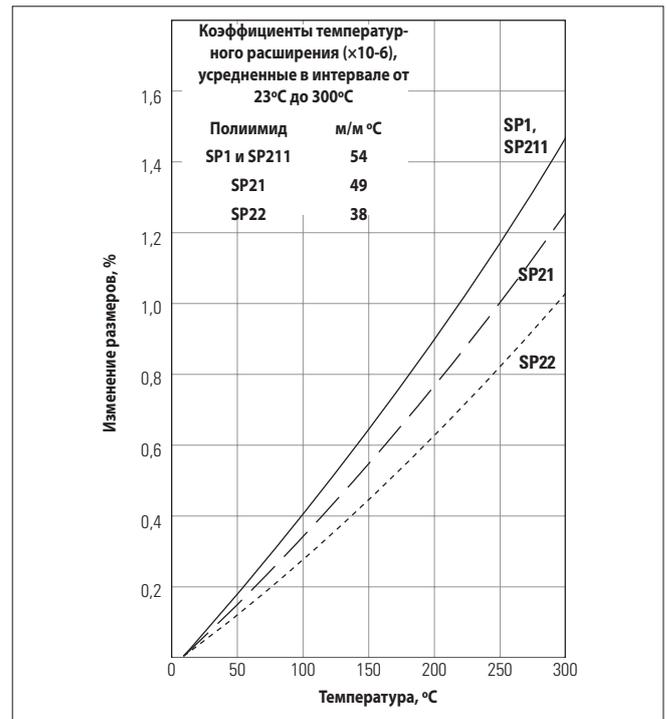


Рис. 28. Заготовки из полиимидов серии SP. Линейное термическое расширение по ASTM D696

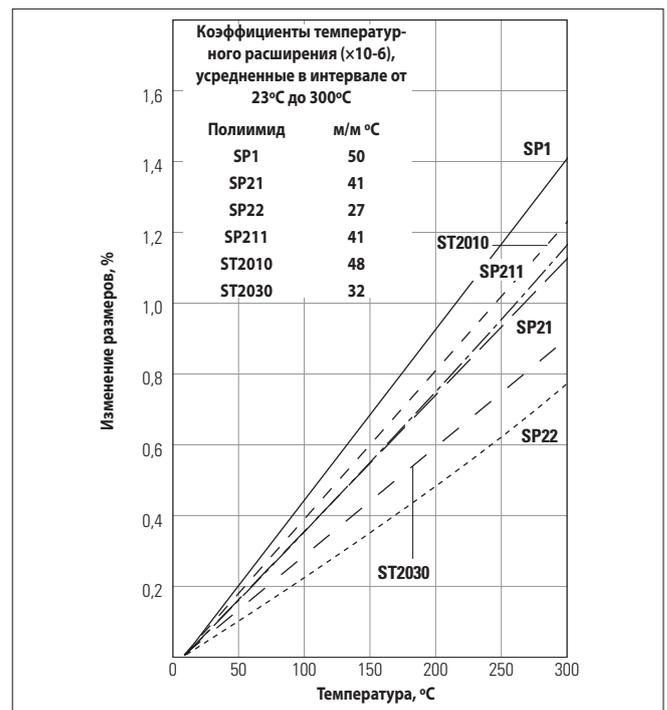


Рис. 29. Детали, изготовленные прямым формованием из полиимидов серий SP и ST. Линейное термическое расширение (⊥ направлению формования) по ASTM D696

Термическое расширение деталей, изготовленных прямым формованием, меньше, чем деталей, изготовленных машинной обработкой из той же полиимидной композиции. Это объясняется анизотропией формованных деталей, обсуждавшейся выше.

Добавление графитового наполнителя уменьшает термическое расширение. Так, полиимиды SP21 и SP22 обладают меньшим термическим расширением, чем ненаполненная смола SP1. Коэффициент термического расширения полиимида SP22 приближается к соответствующему коэффициенту для алюминия, а коэффициент термического расширения полиимида SP262 приближается к соответствующему коэффициенту для стали.

Усталость и ударопрочность

Разрушение материалов при циклических нагрузках происходит раньше, чем при однократной (т.е. при меньших нагрузках, чем предел прочности при растяжении). Это свойство называют разрушением от усталости. На рис. 30 изображены циклические нагрузки, в диапазоне от 10^5 до 10^7 циклов, которые требуются для разрушения заготовок, изготовленных прямым формованием из материалов SP1 и SP21, при температурах от 23°C до 260°C. Циклическая нагрузка состояла из чередующихся растяжений и сжатий с частотой 1800 циклов в минуту. При такой частоте эффект перегрева образца, которое могло бы привести к преждевременному разрушению, пренебрежимо мал.

Хотя результаты испытаний материала на разрушение от усталости можно использовать как руководство для конструкторских разработок, нельзя пренебрегать оценкой условий среды и концентраций напряжений. Хотя опытные

образцы обычно имеют ровные поверхности, присутствие прорезей, царапин, отверстий или острых углов может вызвать концентрацию напряжений. Поэтому никакие лабораторные испытания на усталость не могут заменить исследования поведения детали в реальных условиях или модельных исследований.

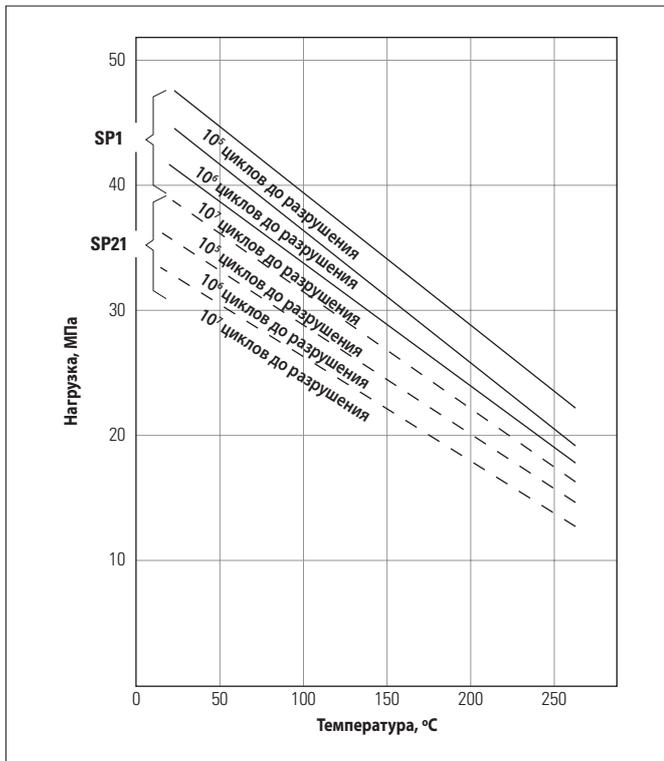


Рис. 30 Заготовки из полиимида серии SP. Типичная стойкость к усталости в зависимости от температуры, при циклическом чередовании растяжений и сжатий с частотой 1800 циклов в минуту (30 Гц)

Ударопрочность деталей трудно предсказать, поскольку это свойство зависит от геометрии детали, концентраций напряжений и скорости приложения нагрузки. Для увеличения ударопрочности детали должны быть сконструированы таким образом, чтобы площадь приложения нагрузки была максимальной. Достигнуть максимальной упругости детали можно также увеличением расстояния, на которое передается энергия удара.

Ударопрочность полиимидов серий SP и ST, как и большинства других пластмасс, сильно зависит от наличия разрезов, что и было продемонстрировано испытаниями на ударопрочность деталей с разрезом по Изоду (Таблицы 1 и 4). Как большинство других материалов, так и полиимиды требуют, чтобы при проектировании деталей конструктор избегал острых углов и других концентраторов напряжений в детали.

Электрические свойства

Сочетание очень хороших электрических свойств, высокой прочности и отличной термической и радиационной стойкости делает детали из полиимидов VESPEL® предпочтительными для применений в электротехнике для применения в экстремальных условиях. Еще более важно то, что детали из полиимидов VESPEL® сохраняют свои хорошие электрические свойства при высоких температурах.

Диэлектрическая постоянная (рис. 31) постепенно снижается с 3,5 при комнатной температуре до 3,0 при температуре 260°C. При заданной температуре, диэлектрическая постоянная практически не меняется в диапазоне изменения частоты электромагнитных колебаний от 10^2 до 10^5 Гц.

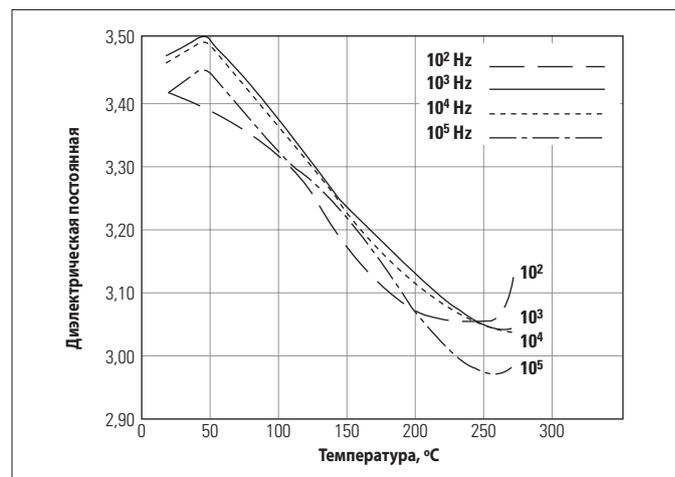


Рис. 31 Диэлектрическая постоянная при различной температуре (SP1) по ASTM D150

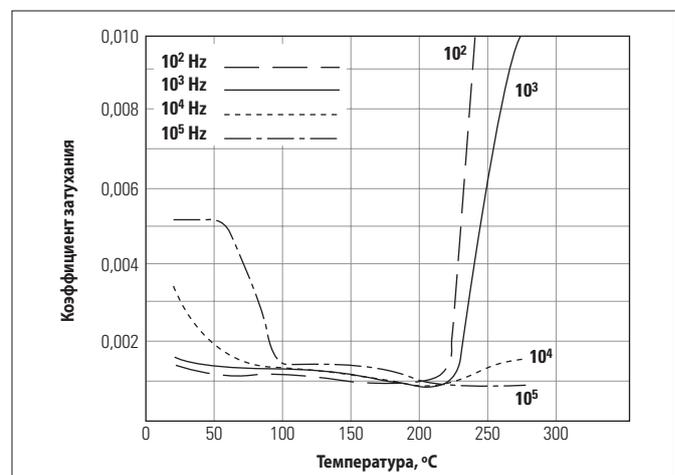


Рис. 32 Коэффициент затухания при различной температуре (SP1) по ASTM D150

Коэффициент затухания (рис. 32) зависит как от температуры, так и от частоты колебаний. До температуры порядка 100°C коэффициент затухания возрастает с частотой, в диапазоне температур от 100°C до 200°C частота практически не влияет на коэффициент затухания, а при температурах выше 200°C коэффициент затухания снижается по мере увеличения частоты.

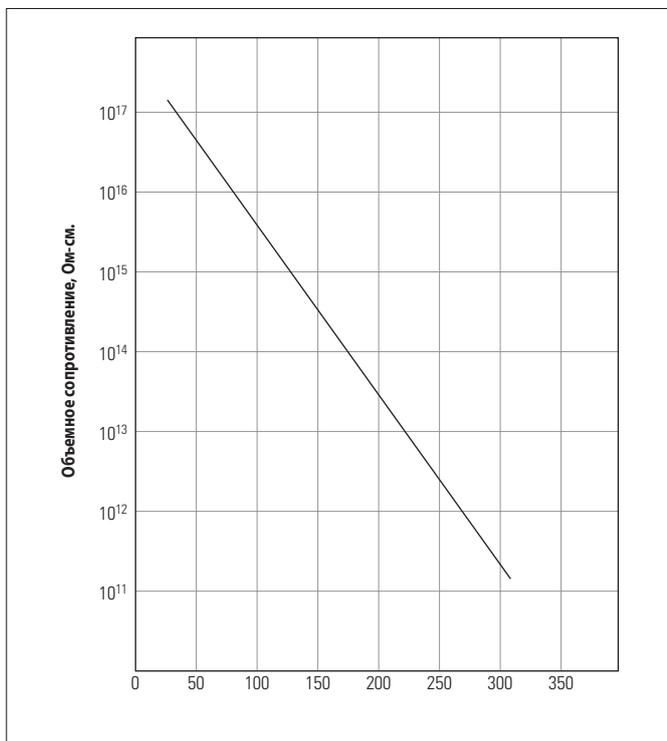


Рис. 33 Заготовки из полиимида SP1. Зависимость объемного сопротивления от температуры, по ASTM D257

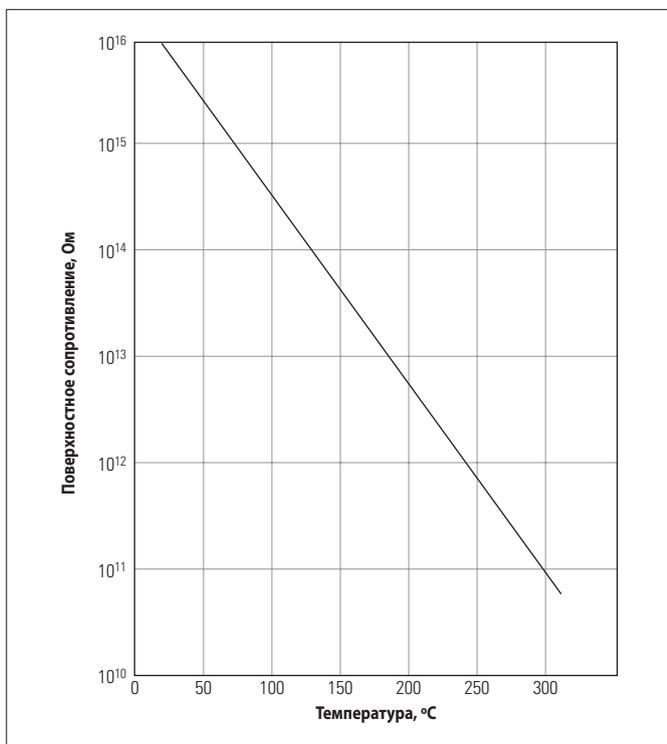


Рис. 34 Заготовки из полиимида SP1. Зависимость поверхностного сопротивления от температуры, по ASTM D257

Как диэлектрическая постоянная, так и коэффициент затухания увеличиваются при возрастании содержания влаги в смоле. Например, при частоте 10³ Гц и комнатной температуре диэлектрическая постоянная сухого опытного образца (валика, изготовленного из полиимида SP1) равна 3,1 и коэффициент затухания равен 0,001. Если же образец содержит 2,4% влаги (что достигается погружением его в воду на 300 часов), то соответствующие характеристики образца будут равны 4,0 и 0,002. После высыхания первоначальные электрические характеристики образца восстанавливаются.

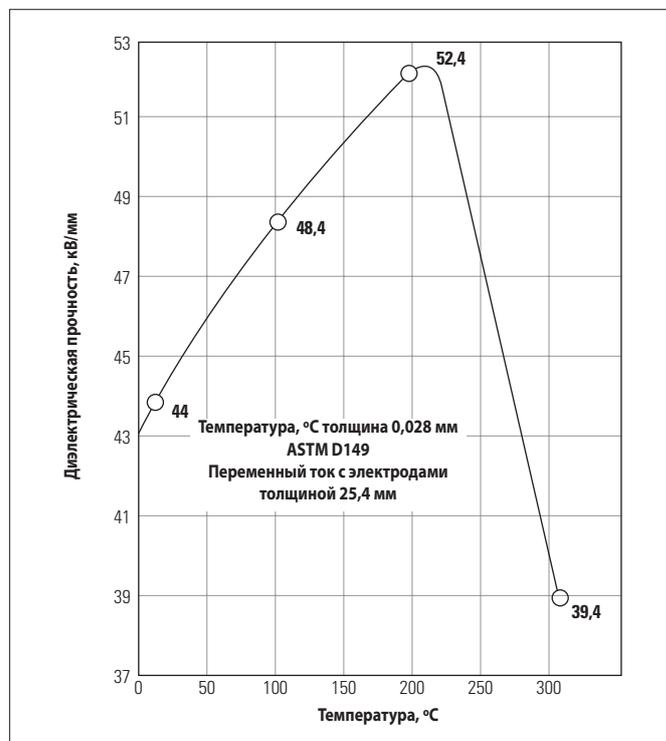


Рис. 35 Заготовки из полиимида SP1. Зависимость диэлектрической прочности от температуры, по ASTM D149

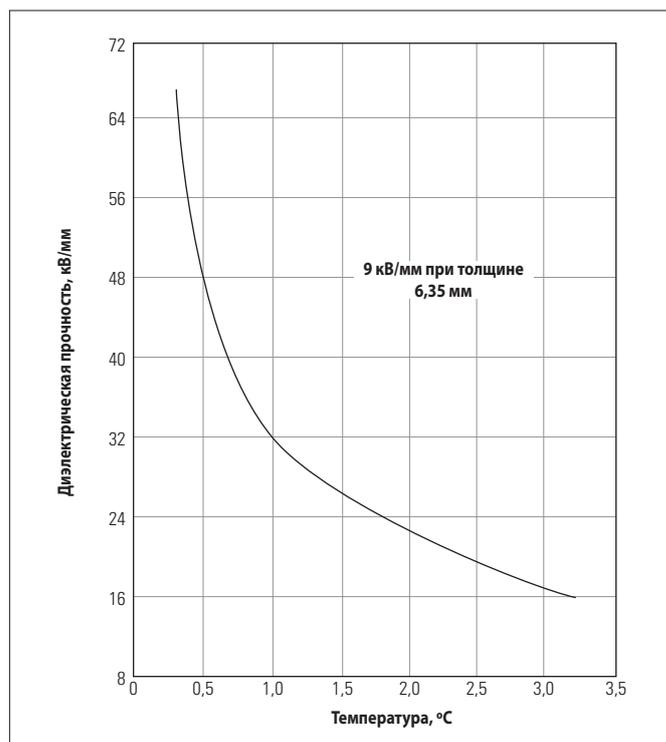


Рис. 36 Заготовки из полиимида SP1. Зависимость диэлектрической прочности от толщины, по ASTM 149 в масле A-8

Содержание влаги в образце довольно мало влияет на поверхностное и объемное сопротивление.

Объемное сопротивление образцов, отлитых из ненаполненного полиимида, равно 10^{17} Ом·см при комнатной температуре (рис. 33). Эта величина линейно снижается до 10^{11} Ом·см при повышении температуры до 300°C. Поверхностное сопротивление (рис. 34) равно 10^{16} Ом при комнатной температуре (рис. 34), и линейно снижается до 5×10^{10} Ом при температуре 300°C.

Короностойкость диэлектрика из смолы VESPEL® превосходит аналогичную величину для фторуглеродов и полиэтиленов. Например, при напряжении 7,8 кВ/мм переменного поля частотой 60 Гц и комнатной температуре коронирование продолжается 2200 часов.

Влияние химикатов

Детали из полиимида VESPEL® SP хорошо переносят воздействие химически агрессивных сред. В таблице 5 приведены результаты измерений предела прочности при растяжении под воздействием химических веществ по стандарту ASTM D543-67 «Устойчивость пластмасс к химическим реагентам».

Улучшенная стойкость к химреактивам

Детали из полиимида VESPEL® ST также демонстрируют улучшенную стойкость к химикатам, особенно к кислотам и щелочам, и более высокую устойчивость к гидролизу, в то же время сохраняя выдающуюся устойчивость к растворителям.

А. Растворители

1. Органические растворители, как правило, мало влияют на механическую прочность и размерную стабильность деталей из полиимидов.
2. Протирать поверхности частей и комплектующих из смолы VESPEL® рекомендуется хлорсодержащими и фторсодержащими растворителями, такими как перхлорэтилен, трихлорэтилен и AXAREL®.
3. Углеводородные растворители, такие как толуол и керосин, практически не влияют на свойства деталей из полиимида.
4. При высоких температурах некоторые растворители, содержащие такие функциональные группы, как m-крезол и нитробензол, могут покоробить смолу SP, при этом ее механические свойства существенно не изменятся.
5. Ниже перечислены некоторые растворители, в которых испытывались образцы из полиимида:

Перхлорэтилен	1900 часов при 100°C 100%-ное сохранение предела прочности при растяжении потеря 0,4% веса
Толуол	1900 часов при 100°C 85%-ное сохранение предела прочности при растяжении потеря 0,1% веса
Этанол	1900 часов при 100°C 100%-ное сохранение предела прочности при растяжении 0,2% увеличение веса
Диэтилкетон	1900 часов при 100°C 100%-ное сохранение предела прочности при растяжении 0,2% увеличение веса
Авиационное топливо JP-4	1900 часов при 100°C 80%-ное сохранение предела прочности при растяжении потеря 0,8% веса

О-дихлорбензол	1000 часов при 180°C 100%-ное сохранение предела прочности при растяжении приобретение 2,4% веса
m-крезол	1000 часов при 200°C 75%-ное сохранение предела прочности при растяжении увеличение размера на 3%
нитробензол	1000 часов при 215°C 85%-ное сохранение предела прочности при растяжении приобретение 9% веса увеличение размера на 2,5%

Б. Масла

1. **Масло для авиационных двигателей:** Изделия из полиимидных смол SP1 и SP21 погружались в масло марки MIL L7808 и в авиационное масло типа 2 при 260°C. В обоих маслах материал SP1 сохранил 60% своей прочности при растяжении и 30% относительного удлинения при разрыве после 600-часовой экспозиции, а материал SP21 соответственно сохранил 90% и 70% указанных свойств. После 1000 часов погружения предел прочности при растяжении материала SP1 составил 30% от первоначальной величины, а материала SP21 – 60%. При этом материал SP1 сохранил 10% своего первоначального удлинения при разрыве, а SP21 – 30%. Обе полиимидные композиции увеличились в весе примерно на 0,2% после погружения в масло MIL L7808 и 0,5% после погружения в авиационное масло типа 2 на 1000 часов. Увеличение размеров образцов в параллельном направлении составило 0,3%, а в перпендикулярном 0,1%.
2. **Силиконовое масло:** При 260°C полиимидная смола SP1 сохранила 70% своей прочности при растяжении и 35% относительного удлинения при разрыве после погружения в масло на 1000 часов, а смола SP21, соответственно, 85% прочности при растяжении и 50% относительного удлинения при разрыве после аналогичной экспозиции. Обе полиимидные композиции добавили 0,3% в весе. В параллельном направлении их размеры увеличились на 0,2%, а в перпендикулярном – уменьшились на величину менее 0,1%.
3. **Очищенные минеральные масла:** После 1000 часов погружения при 200°C прочность при растяжении полиимида SP1 составила 70% от первоначальной, а полиимида SP21 – 90% от первоначальной. Первый материал сохранил при этом 40% своего относительного удлинения при разрыве, а второй – 65%. Оба материала прибавили в весе приблизительно 0,3%. В параллельном направлении их размеры увеличились на 0,1%, а в перпендикулярном – уменьшились на величину менее 0,1%.
4. **Гидравлическая жидкость, содержащая полифосфатный эфир:** После 1000 часов погружения не было отмечено никаких изменений в свойствах материалов.
5. **Трикрезол фосфат (присадка к маслам):** После 1000 часов погружения при температуре 260°C материал SP1 приобрел 1,5% в весе и сохранил 80% своей прочности при растяжении. Размеры образца увеличились примерно на 0,25%.

В. Вода

1. После 500 часов пребывания в воде при 100°C прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве деталей из полиимидных смол SP снижались до 45% и 30% от первоначальных значений, после чего эти свойства уже не менялись.

2. Большинство механических свойств материалов восстанавливается после их высыхания. Это означает, что снижение прочности при погружении в воду при 100°C происходит не в результате химических изменений.
3. Детали из полиимида VESPEL® могут применяться в водной среде при температурах до 100°C, при этом нагрузки должны быть не слишком велики, учитывая снижение их механической прочности.
4. Как и все полиимидные смолы, материал SP подвержен гидролизу. Смола SP может сильно потрескаться в воде или водяном паре при температурах выше 100°C.

Г. Кислоты

1. Даже кратковременное воздействие концентрированных неорганических кислот вызывает хрупкое разрушение деталей из полиимида.
2. Погружение деталей из полиимида в концентрированную (38%) соляную кислоту на 120 часов при комнатной температуре привело к снижению прочности при растяжении на 30% и к снижению относительного удлинения при разрыве на 40%.
3. Погружение деталей из полиимида в концентрированную (70%) азотную кислоту на 120 часов при комнатной температуре привело к снижению прочности при растяжении на 60% и к снижению относительного удлинения при разрыве на 75%. Столь большие изменения, вероятно, частично обусловлены окислением в кислоте.
4. Погружение деталей из полиимида SP в 5%-ную соляную кислоту на 1900 часов при 100°C привело к снижению прочности при растяжении на 80%.
5. Погружение деталей из полиимида SP в 15%-ную азотную кислоту на 1900 часов при 100°C привело к снижению прочности при растяжении на 80%.
6. Как правило, разбавленные кислоты и кислые водные растворы неорганических солей оказывают на смолу SP примерно такое же действие, как и сама вода.

Д. Основания

1. Обычно полиимидные смолы разрушаются под действием щелочей. Водные растворы щелочей вызывают химическое разложение смол VESPEL®, при этом их механические свойства быстро утрачиваются.
2. Воздействие 5%-ного раствора гидроксида натрия в течение 120 часов при комнатной температуре привело к снижению прочности на разрыв на 45%. Первоначально коричневые детали из полиимида SP стали черными, а их масса увеличилась на 27%.
3. Нельзя подвергать детали из полиимидов воздействию любых растворов щелочей с pH > 10, в том числе растворов солей.
4. Не рекомендуется промывать детали щелочными растворами.
5. Неводные растворы щелочей, например, ангидрид аммония (жидкость или пары) и гидразины быстро вызывают химическое разложение полиимида SP.
6. Быстрое хрупкое разрушение этого полиимида наблюдалось даже после кратковременного погружения в жидкий ангидрид аммония.
7. При воздействии паров аммония наблюдалось распухание деталей и другие признаки химических реакций.

8. Жидкий и газообразный несимметричный диметилгидразин в течение короткого времени вызывал снижение прочности на разрыв на 55% и снижение относительного удлинения при разрыве на 35%.
9. Первичные и вторичные амины могут вызвать химическое разложение полиимида SP.
10. При эксплуатации деталей и комплектующих из полиимидов необходимо избегать воздействия любых щелочных растворов.

Таблица 5. Воздействие химических веществ

Химические среды	°C	Время, ч	% сохраненной прочности на разрыв, полиимидная смола SP1
Органические растворители, М-крезол	200	1000	75 ¹
о-дихлорбензол	180	1000	100
Диэтилкетон	100	1900	100
Этанол	100	1900	100
Нитробензол	215	1000	85 ¹
Перхлорэтилен	100	1900	100
Толуол	100	1900	85
Промышленные жидкости Гидравлическая жидкость ("Скидрол") Polyphosphate ester	120	1000	100
Авиационное топливо JP-4	100	1900	80
Авиационные масла (MIL L 7808G)	260	600	60 (90) ²
	260	1000	30 (60) ²
Минеральное масло	200	1000	70 (90) ²
Силиконовое масло	260	1000	80
Трикрезилфосфат (присадка к маслу)	260	1000	80
Кислоты Уксусная, 15%	100	1900	20
Соляная, 38%	23	120	70
Соляная, 5%	100	1900	15
Азотная, 70%	23	120	40
Основания Гидроксид натрия, 5%	23	120	55
Окислители Четырехокись азота	23	120	60

1 Разбухание.

2 Полиимид SP21 (15% графитового наполнителя).

Е. Окислители

1. Химические вещества, обладающие сильными окислительными свойствами, могут вызвать окисление полиимида VESPEL® даже при комнатной температуре (см. влияние азотной кислоты).
2. Четырехокись азота (N₂O₄) вызвала 40%-ное снижение прочности на разрыв и относительного удлинения при разрыве после 120-часовой экспозиции при комнатной температуре. При этом вес образца увеличился на 3%.

Ж. Совместимость с кислородом

Важным свойством полиимида SP21 является его совместимость с жидкими и газовыми кислородными системами.

Полиимидная смола SP21 от DuPont испытывалась НАСА и удовлетворяет стандарту MSFC-SPEC-106B «Испытания совместимости материалов с жидкими кислородными системами». В настоящее время этот материал одобрен в качестве предпочтительного.

Полиимид SP21 также испытывался конструкторским бюро морской авиации министерства морского флота США и был признан соответствующим стандарту MIL-V-5027C «Неметаллические материалы, совместимые с кислородом».

В других лабораториях было показано, что полиимид ST2010 так же совместим с кислородом, как SP21.

Вероятно, другие наполненные полиимидные композиции удовлетворяют требованиям указанных выше стандартов, но они еще не испытывались. Ненаполненная смола SP1 не удовлетворяет этим стандартам.

Другие свойства

Выветривание

Детали из полиимидов серии SP несколько теряют прочность на разрыв и относительное удлинение при разрыве после продолжительного воздействия внешней среды. Поэтому возможность их применения вне помещений может обсуждаться только после соответствующих испытаний. Детали из полиимида VESPEL® совершенно не страдают от воздействия грибков. Испытанные образцы удовлетворяют стандарту MIL-E 5272 и Федеральной спецификации CCC-T-191b, методы 5762 и 5751, в части устойчивости к плесени и гниению.

Токсикологические аспекты

Никаких токсичных свойств полиимидов SP не было выявлено при испытаниях на лабораторных животных, которые подвергались ингаляционной, пероральной и кожной экспозиции. Компания DuPont не обращалась в Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA) за получением разрешений на использование деталей и комплектующих из полиимида VESPEL® в пищевой промышленности.

Полимер SP чрезвычайно устойчив к нагреванию, по сравнению с большинством органических материалов. Однако при его горении может выделяться окись углерода (CO). Необходимы специальные меры предосторожности, чтобы концентрации CO не превышали допустимых уровней безопасности – например, вентиляция закрытых помещений, в которых используются детали и комплектующие из полиимида VespeI® при высоких температурах.

Газовыделение

После того как вся поглощенная влага была удалена из деталей из полиимида VespeI®, потеря веса образцов в вакууме при высоких температурах была очень мала. При испытаниях в исследовательском центре Льюиса НАСА образцы вначале высушивались при температуре 93°C, а потом нагревались до температуры 260°C. При этом скорость потери веса составляла 10⁻¹⁰ г/см²/с. При нагревании до температуры 350°C скорость потери веса составляла 10⁻⁷ г/см²/с.

Классификация воспламеняемости по UL 94

Полиимид VESPEL® относится к классу UL 94-5V и 94 V-0. Этот класс воспламеняемости был присвоен полиимидным пленкам из смол SP1, SP21, SP22 и SP211 с минимальной толщиной 1,6-1,7 мм. Подобных испытаний смолы серии ST еще не проходили.

Условия хранения

Для обеспечения наилучших эксплуатационных свойств детали и заготовки из полиимида VESPEL® лучше всего хранить внутри помещений при нормальных условиях. Температура хранения не должна превышать 40°C. Не рекомендуется воздействие солнечных или ультрафиолетовых лучей, других излучений, прямой контакт с водой и химикатами.

Ограниченный кислородный индекс

ASTM D2863

Определение: Ограниченный кислородный индекс (LOI) – минимальная концентрация кислорода в текущей газовой смеси кислорода и азота, которая поддерживает горение.

Детали из полиимида VESPEL® SP1 53% O₂

Детали из полиимида VESPEL® SP21 49% O₂

Воспламенение под напряжением, UL 746 A

Детали толщиной 1,6 и 3,2 мм из полиимида VESPEL® марок SP1, SP21, SP22 и SP211 при испытаниях были отнесены к классу «0». Детали из полиимида серии ST в то время не испытывались.

Прямое формование

Промышленные партии деталей из полиимида VESPEL® наиболее выгодно производить разработанным DuPont методом прямого формования. Этот метод подобен применяемому в порошковой металлургии и позволяет производить высокоточные детали или заготовки, почти идентичные произведенным машинной обработкой из болванок. Преимуществом прямого формования является минимальное образование отходов материала. В большинстве случаев формование производится настолько точно, что детали не требуют доводки на станках.

Хотя не существует никаких ограничений по заказу минимальных партий, и каждый заказ рассматривается индивидуально, экономии затрат можно достичь при заказах крупных партий от 1000 единиц.

Высокоточная пресс-форма покупается и принадлежит компании DuPont. Однако заказчик должен оплатить конструирование, производство и испытания пресс-формы.

Прямое формование имеет свои ограничения. Не все формы и размеры можно изготовить прямым формованием, хотя многие детали, первоначально считавшиеся невыгодными для формования, теперь успешно штампуются.

Одноуровневые детали – втулки, диски и т.п. – с отверстиями и без, как и любой плоский контур, которые можно штамповать при помощи идентичных одинарных верхнего и нижнего пуансонов, производятся регулярно. Для формовки отверстий используется палец подачи стержня. Этому пальцу на станке можно придать любой радиальный контур, соответствующий контуру отверстия. Фаски, пазы и зубцы можно формовать так же легко, как и круглые отверстия. В некоторых случаях можно формовать даже глухие отверстия (например, для крышки). Небольшие углубления и ступеньки внутри плоской детали также можно изготавливать прямым формованием, с ограничениями, указанными в разделе «конструкционные критерии».

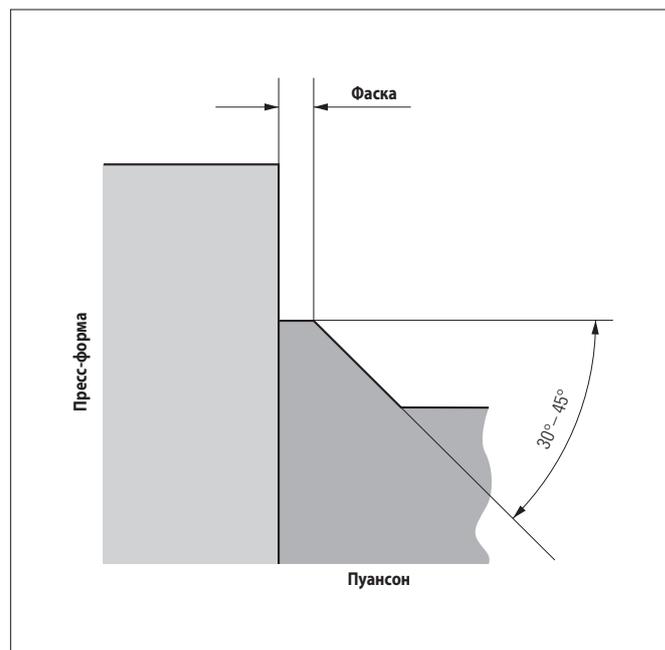
Многоуровневые детали требуют нескольких прессований, поскольку порошок не так легко пересыпается от одного уровня к другому. Двухуровневые детали, такие как втулки с фланцами, также можно формовать. Это достигается последовательным движением двух пуансонов вверх и одного пуансона вниз. Детали, которые имеют более двух уровней, обычно требуют машинной доводки.

Геометрия деталей должна быть такой, чтобы их можно было извлечь из пресс-формы. Внутренние выточки, отверстия под прямыми углами к направлению прессования, коническое сверление, развернутые углы и резьбу нельзя изготавливать формованием. Однако часто те элементы детали, которые нельзя получить формованием, можно выполнить машинной доводкой без существенного увеличения стоимости изготовления формованных деталей.

Толщина стенок зависит от высоты детали. Более высокие детали требуют более толстых стенок, поскольку порошок должен равномерно засыпаться и заполнить полость при прессовании.

Фаски, если они необходимы, должны делаться под углами не более 30° к горизонтали, т.е. считая перпендикулярно направлению прессования. Можно производить фаски под углом 45°, но при этом срок службы пресс-формы снижается. При производстве деталей с фасками, пуансоны должны иметь 0-0,3 мм фаску для предотвращения крошения кромок.

Прямым формованием можно изготавливать детали толщиной примерно до 58 мм.



Физические свойства формованных высокоточных деталей из полиимида VESPEL® несколько отличаются от свойств таких же деталей, выточенных из заготовок.

В большинстве случаев конструктор может не обращать внимания на эту небольшую разницу в свойствах. Однако когда речь идет о применениях в критических условиях, то мы рекомендуем Вам самостоятельно испытывать формованные детали.

Детали, изготовленные прямым формованием

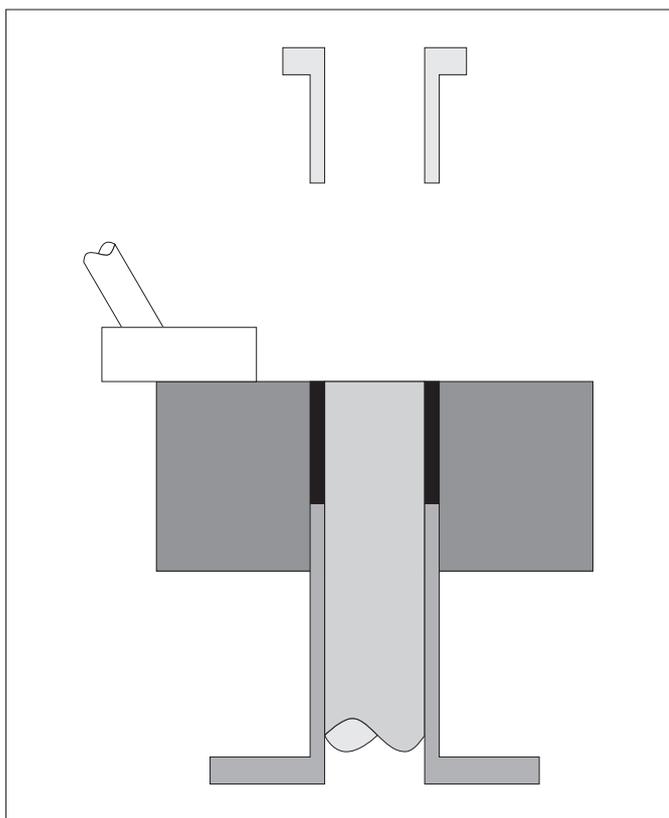
Процесс формования, разработанный DuPont, обычно проходит в два этапа.

Быстродвигающиеся вертикальные прессы с перекидной муфтой, снабженные пресс-формами, прессуют детали из полиимидного порошка, подобно тому как производится прессование из керамического порошка. Но из-за гораздо более жестких допусков процесс прессования должен строго контролироваться для точного соблюдения параметров. Для обеспечения однородной плотности и стабильных размеров деталей должны учитываться характер засыпания порошка и его поведение при упругом нагружении.

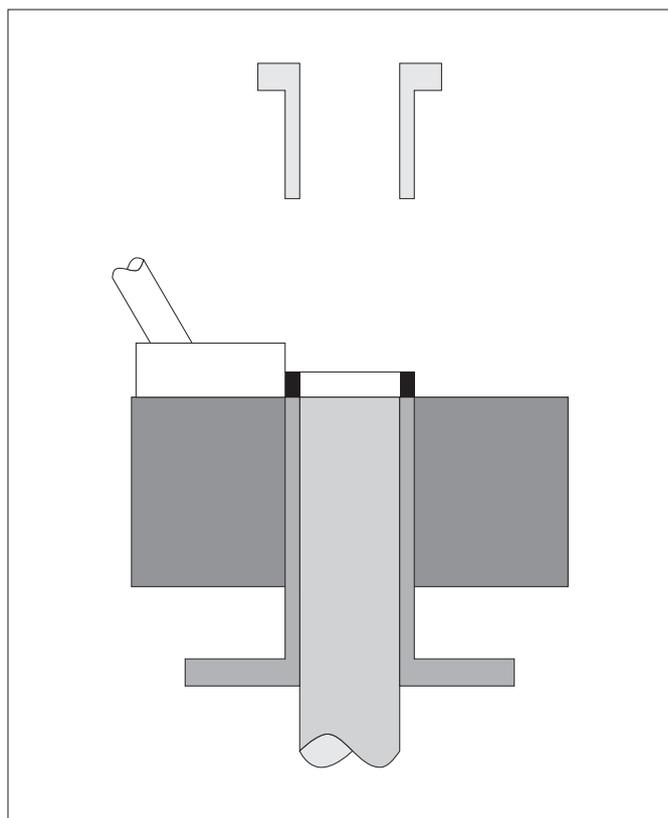
На первом этапе производятся полуфабрикаты – это твердые детали из полиимидного порошка с особыми наполнителями, в зависимости от требуемых при конечном использовании свойств.

Эти полуфабрикаты большими партиями загружаются в поддоны или контейнеры, чтобы избежать механических повреждений, чтобы потом направиться на второй этап – обжиг.

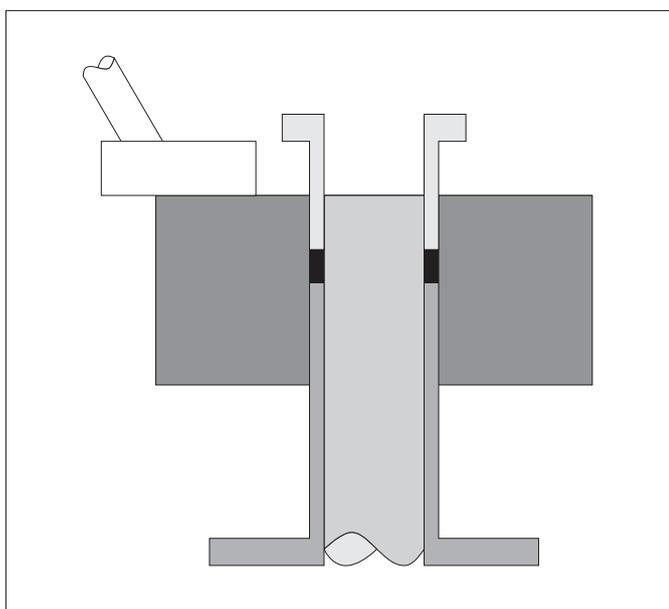
Обжиг деталей происходит в металлических контейнерах в больших печах при высоких температурах. При таких повышенных температурах требуется принудительное удаление кислорода из печей, для чего его концентрация постоянно контролируется. Через несколько часов обжига детали приобретают свои окончательные свойства.



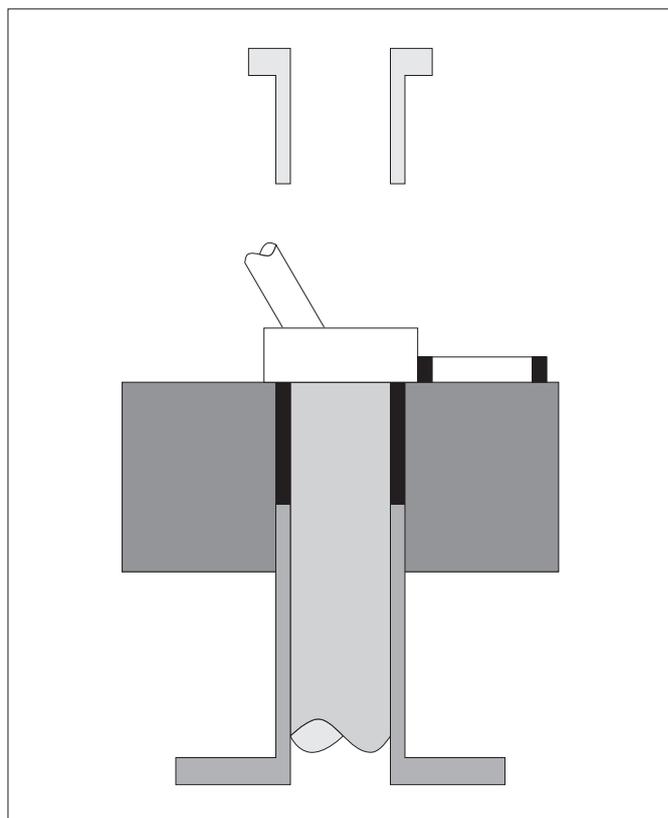
Наполняющий лоток отъезжает назад, после того как порошок был засыпан в пресс-форму. Верхний и нижний пуансоны раздвинуты в свои верхнюю и нижнюю позиции соответственно.



Верхний пуансон поднимается вверх, а нижний пуансон выдавливает полуфабрикат детали из пресс-формы.



Оба пуансона сдвигаются навстречу друг другу уплотняя порошок и формируя деталь.



Нижний пуансон отъезжает вниз, в то время как наполняющий лоток засыпает новую порцию порошка в пресс-форму, а полуфабрикат детали выталкивается наружу из штамповального станка.

Во время обжига детали усаживаются в зависимости от их размеров, формы и направления прессования. Усадка деталей должна учитываться при конструировании и изготовлении пресс-формы, которое требует много знаний и опыта, ведь различные добавки по-разному влияют на усадку деталей в каждом из трех измерений.

Во время усадки деталей происходят и другие изменения. Полуфабрикат всегда отражает особенности и характер поверхностей пресс-формы, и пуансонов. При обжиге все поверхности приобретают несколько волнистый профиль с шероховатостью около 7 Rz (по метрической системе, DIN 4786). Под микроскопом видны мягкие синусоидальные волны, из которых состоит поверхность поперечного сечения такого шероховатого профиля. Именно эти волны позволяют полиимиду VESPEL® работать в контакте с металлическими частями в скользящих подшипниках без дополнительной машинной обработки поверхностей подшипника.

Все острые углы детали-полуфабриката сглаживаются при обжиге в округлые формы с радиусом примерно 0,05 мм. Это свойство очень полезно, потому что не нужно специально проектировать детали с закруглениями и фасками, как при работе с металлом.

В соответствии с техническими условиями заказчика детали проходят заключительную проверку и документирование, после чего они готовы либо для машинной обработки или для упаковки и отправки.

Возможности изготовления деталей прямым формованием

Наименьшая толщина	~1 мм
Наибольшая толщина	~58 мм*
Наибольший внешний диаметр	~300 мм
Наименьший внутренний диаметр	~0,5 мм
Наибольшая площадь поверхности	~2800 мм ² прессованием при нагревании может быть увеличена до ~7000 мм ²
Класс обработки поверхности	~1 мкм (Ra)
Зенкованные фаски	0-0,3 мм



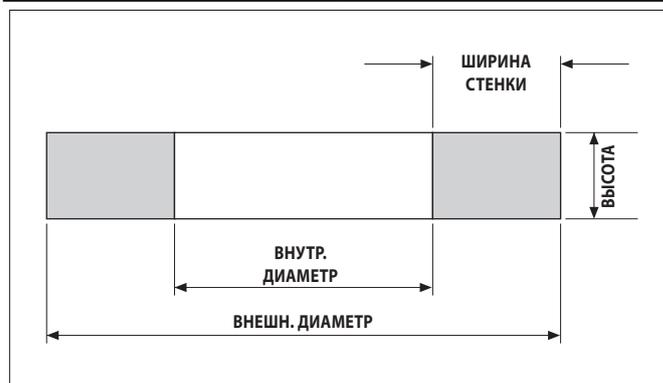
* цилиндрические части длиннее 58 мм можно прессовать горизонтально, а не вертикально. Однако эти части будут иметь две фаски (см. чертеж)

Допуски и общее руководство по промышленному проектированию

Ниже представлены допуски и общие соображения по проектированию формованных деталей. Тем не менее, каждую деталь надо рассматривать индивидуально, допуская исключения и отклонения от общих принципов, в зависимости от функционального назначения детали и условий той среды, в которой она будет работать.

Стандартные допуски

Размерность	Стандартный допуск
Диаметры, мм	μм
7,5-12,5	±40
12,5-19	±50
>19	±65
Высота, мм	μм
0,4-2,5	±75
2,5-6,5	±100
6,5-12,5	±125
12,5-25	±150



Обратите внимание: Для оптимального использования возможностей по допускам деталей из материала VESPEL® не указывайте оба диаметра – наружный и внутренний, а укажите только наиболее важный из них и толщину стенки!

Дополнительное руководство по допускам (в мм)

Диаметр	Концентричность	Круглость	Параллельность	Плоскостность*
<25,4	0,040	0,050	0,040	0,050
25,4-50,8	0,050	0,125	0,075	0,125
>50,8	0,050 ⁺¹	0,125 ⁺²	0,075 ⁺³	0,125 ⁺²

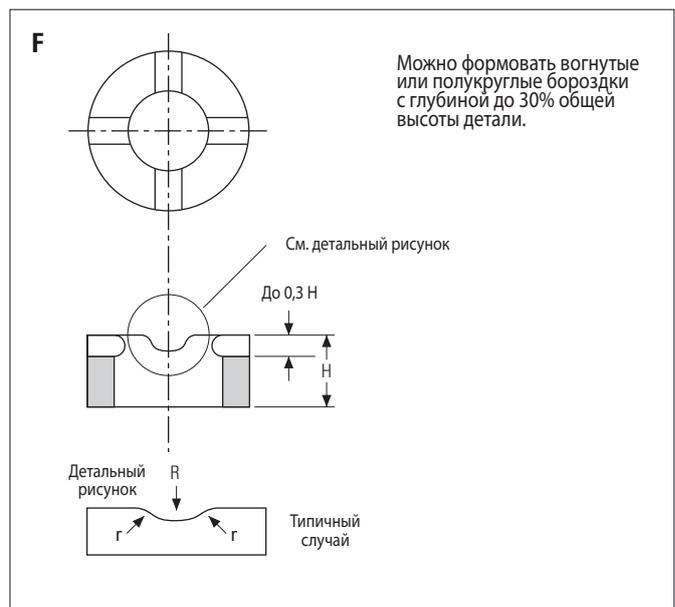
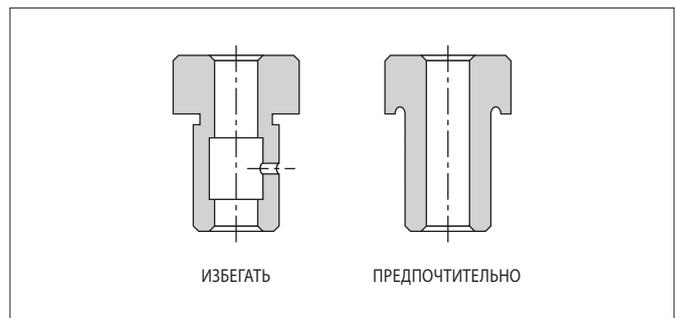
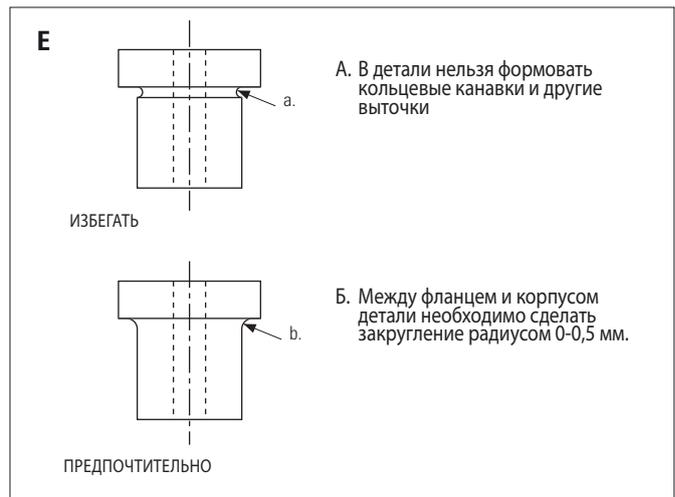
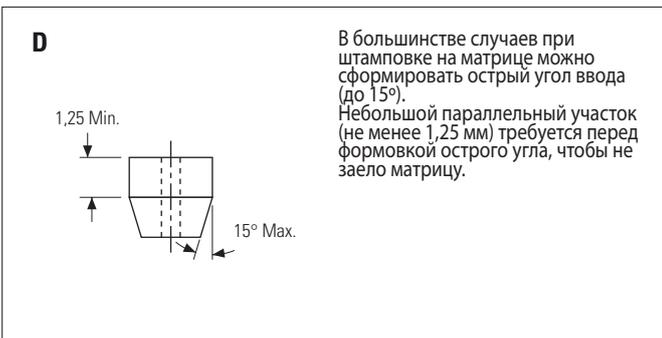
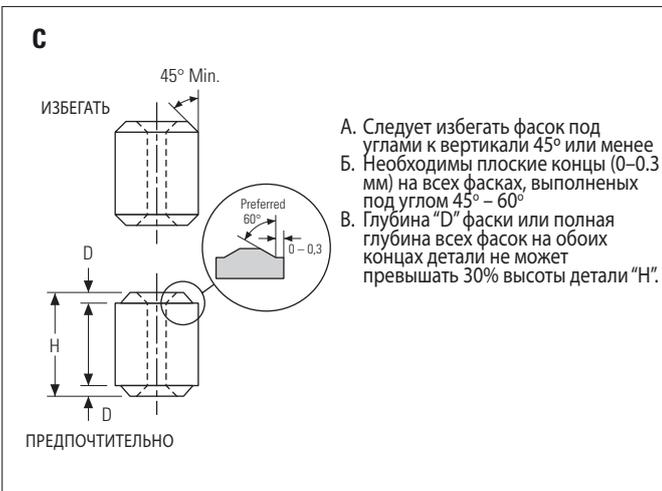
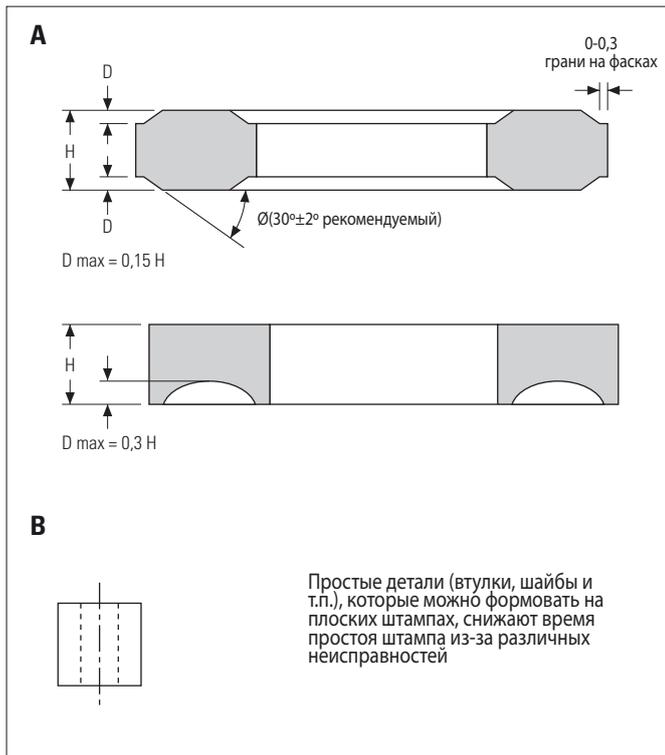
1 = 0,0005*(d-50,8) мм

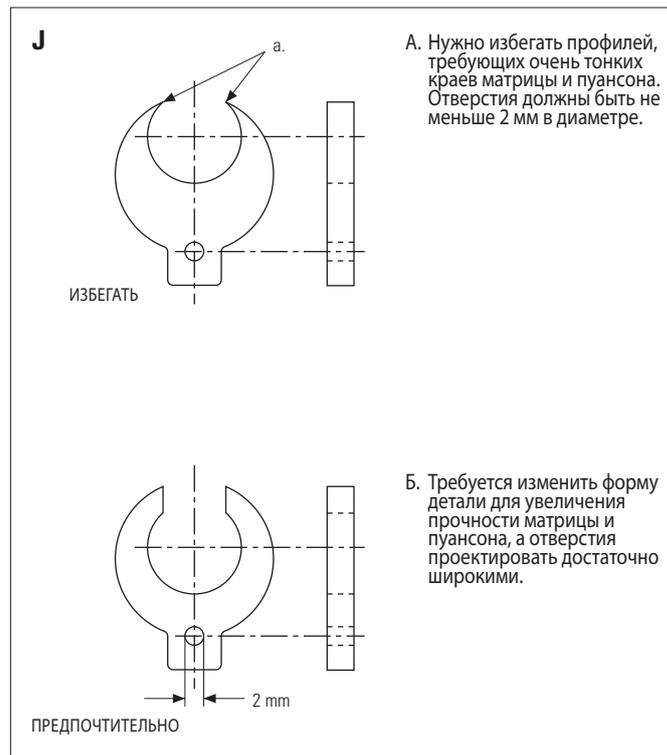
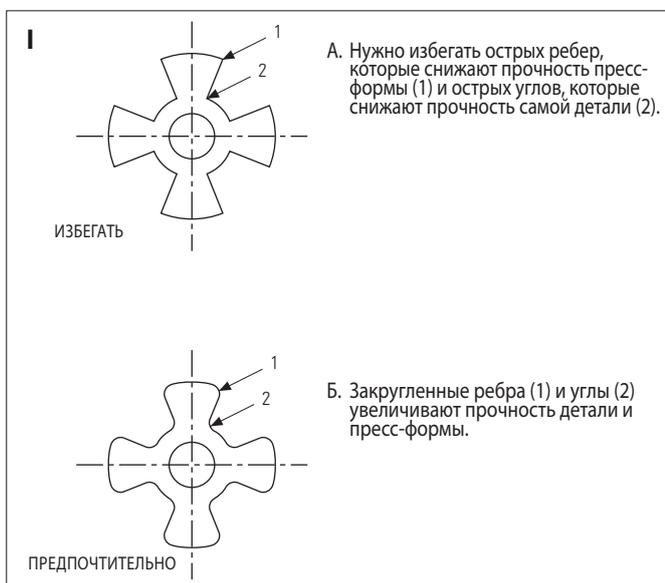
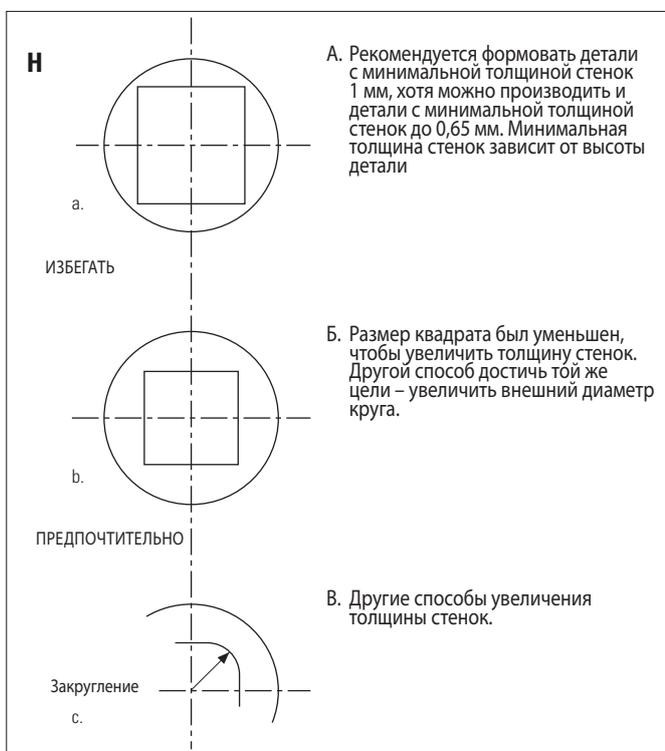
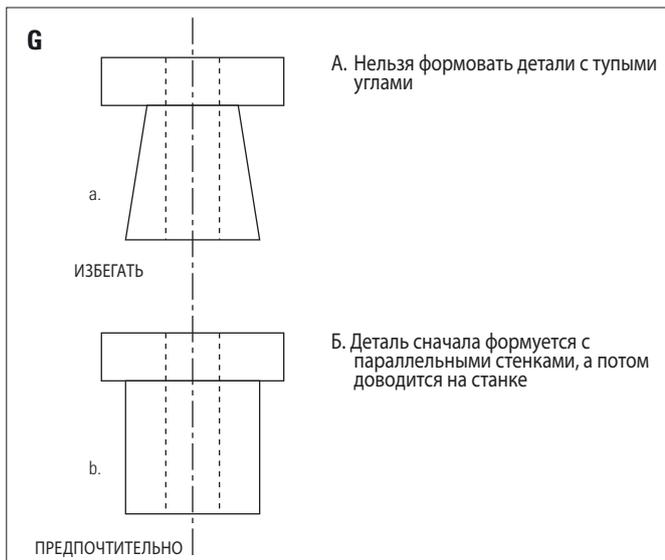
2 = 0,005*(d-50,8) мм

3 = 0,001*(d-50,8) мм

* Для простых деталей

Факторы, учитываемые при проектировании





Детали, требующие последующей обработки после прямого формования

Поскольку детали, изготовленные прямым формованием, штампуются на вертикальных прессах, конфигурация деталей ограничена одномерным движением пресса.

В этом заключается основное ограничение штамповки деталей – они не могут иметь выемок в направлении перпендикулярном прессованию. Такие выемки не позволили бы вынуть деталь после прессования.

В отличие от многих полимеров, материал VESPEL® легко обрабатывать на всех металлорежущих станках. Детали легко режутся и при обработке получают очень гладкие поверхности.

Машинная обработка может быть выполнена компанией DuPont или в любой другой мастерской по требованию заказчика.

При машинной обработке деталей из полиимида VESPEL® обычно легко достижимы допуски качества «8» (см. Приложение В о допусках ISO).

Детали, изготовленные машинной обработкой

Стандартные заготовки из полиимида VESPEL® изготавливаются DuPont из высокопрочных полиимидных смол SP в форме прутков, труб, бляшек, колец, дисков и брусков (см. Приложение А).

Опытные образцы, небольшие партии деталей и детали сложной формы из полиимида VESPEL® лучше всего изготавливать машинной обработкой. Следует учитывать, что, как правило, производство партии деталей количеством более 1000 штук станет более экономически выгодным, если DuPont изготовит их методом прямого формования.

При испытаниях деталей из полиимида VESPEL® очень важно использовать именно тот метод изготовления (формование или машинная обработка), который затем будет применен в промышленных масштабах. Именно поэтому для изготовления опытных образцов DuPont предлагает стандартные заготовки, изготовленные прямым формованием.

Стандартные заготовки из полиимидных смол серии ST еще не предлагаются производителем.

Общие приемы машинной обработки

Заготовки из полиимида VESPEL® относительно легко обрабатывать на станках из-за их механической прочности, жесткости и размерной стабильности при температурах машинной обработки. Кроме этого, детали можно вытачивать на стандартных металлорежущих станках, гарантируя ранее невыполнимые для пластмасс допуски. В большинстве случаев используются стандартные приемы металлообработки.

Предлагаемая инструментальная оснастка

- **Твердосплавные инструменты:** класс C-2
- **Kennametal K-11, Carbaloy 895** или эквивалент: когда длительный эксплуатационный срок инструмента особенно важно.
- **Быстрорежущая инструментальная сталь:** Для мелкосерийного производства на многоточечных инструментах, таких как торцевая фреза, конический зенкер и развертки.

Особые соображения

- **Перегревание:** не позволяйте материалу нагреваться до такой степени, чтобы его нельзя было брать голыми руками. При перегреве детали заточите инструмент и/или снизьте скорость подачи.
- **Легкая работа:** используйте инструмент, который хорошо работает с латунью.
- **Вибрация инструмента:** инструменты должны иметь положительный главный передний угол от 0° до 5° и нулевой передний угол в тыльной плоскости, чтобы снизить вибрацию инструмента.
- **Особые размеры:** Детали большого диаметра или с тонкими стенками успешно производились из полиимида VESPEL® с жесткими допусками. Для сохранения размерной стабильности деталь должна сперва пройти грубую обработку примерно до размеров на 0,4-0,5 мм больше готовой детали, а перед окончательной доводкой прийти в равновесие с внешней средой при температуре 23°C и относительной влажности 50%.

Крепление

Основная предосторожность при креплении заготовок из полиимида VESPEL® в станках состоит в предотвращении любых деформаций из-за давления зажимного приспособления, патрона или фиксатора. В отличие от металлов, пластмассы, в том числе смолы VESPEL®, деформируются при сильных зажимах.

Надежные методы крепления

- **Зажимные патроны внешних и внутренних диаметров:** это самый надежный способ крепления, с достаточным давлением, чтобы обеспечить хорошее удержание заготовки.
- **Фиксатор:** шестилачковая лента лучше всего распределит удерживающую силу по поверхности заготовки.

Разрезание

Стандартные заготовки из полиимида VESPEL® можно легко резать циркулярной или ленточной пилой. Для достижения наилучших результатов воспользуйтесь следующими советами:

Циркулярные пилы:

- Используйте острое лезвие без развода зубьев.
- Для разрезания 75-миллиметровых заготовок из полиимида VESPEL® успешно использовалась циркулярная пила с диаметром 245 мм и числом зубьев от 3 до 5 на сантиметр. Поверхностная скорость пиления составляла 1800-2400 м/мин с водяным охлаждением.

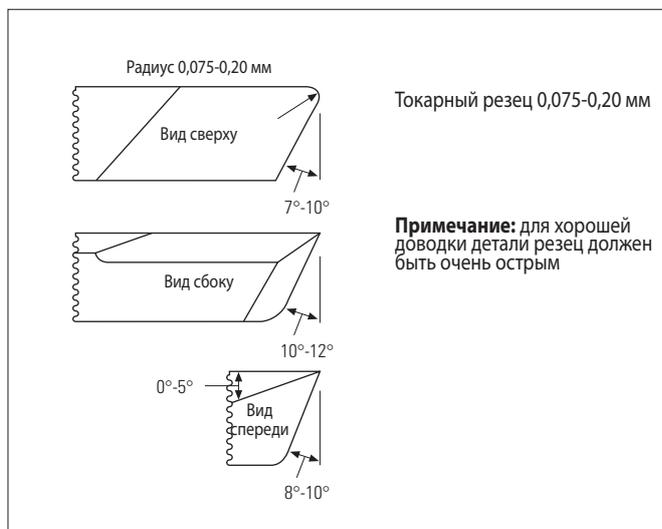
Ленточные пилы:

- Профили из полиимида VESPEL® толщиной 125 мм можно резать ленточной пилой без охлаждения, используя острое лезвие с 4 зубцами на сантиметр и со стандартным разводом зубьев.
- Лезвия с более мелкими зубцами можно использовать для разрезания более тонких профилей.
- Используйте лезвия из специальных сплавов для разрезания большинства наполненных полиимидных композиций.

Обточка

Для качественной доводки деталей из полиимида VESPEL® на токарном станке воспользуйтесь следующими советами:

- Обрабатывайте деталь на обычном токарном станке – патронном или со стандартным зажимом.
- Используйте резцы с твердосплавным покрытием для получения жестких допусков.
- Полезно использовать инструменты для ломания стружки.
- Пользуйтесь только хорошо заточенными инструментальными резцами, с радиусом закругления инструментального угла 0,08-0,2 мм. Заточка должна проверяться под увеличением 1×10, при необходимости затачивайте инструментальный угол ручным хонем с алмазной крошкой 800 микрон.
- Скорости вращения должны быть такие же, как при обработке латуни. Скорость подачи можно варьировать в широком диапазоне без ущерба для качества.
- Можно охлаждать деталь для сохранения размерной стабильности и снижения термических эффектов.
- Вибрация детали возникает при обработке тупым резцом.



Условия обточки	Скорость поперечной подачи за один оборот, мм
Грубая обточка	0,25-0,50
Доводка	0,25-0,05
Грубое сверление	0,50-0,1
Разрезание на части	0,075-0,20

Фрезеровка

Как правило, к заготовкам из полиимида VESPEL® можно применять все приемы фрезеровки металлов. Соблюдайте такие же меры предосторожности при перегреве, креплении заготовки, при заточке фрез, избегайте вдыхания опилок и т.п.

Способы борьбы с откалыванием кромок:

- Укрепление кромки каким-либо другим материалом.
- Восходящее фрезерование.
- Замедление поперечной подачи до 50 мм в минуту или меньше в момент прохождения кромки.
- Использование летучей фрезы по мере возможности, поскольку они работают лучше всего.

Избегайте сколов

Для сверления тонких поперечных сечений без сколов мы предлагаем:

- Использовать сверло с 5-градусным срезом у торца или торцевую фрезу. Если возможно, используйте автоматическую подачу или ослабляйте давление подачи при прохождении сверла. Скорость сверления в пределах 12-15 м/мин обычно дает хороший результат.

Сверление

Детали из полиимида VESPEL® более эластичны, чем металл, и имеют более высокий коэффициент температурного расширения. Из-за этого больше вероятность застревания сверла. В различных ситуациях следующие приемы могут помочь избежать застревания сверла.



На выходе отверстия могут оказаться заусенцы. В этом случае понадобится повторный проход сверлом. Если это не помогает, обратитесь к параграфу «удаление заусенцев».

Обычное спиральное сверло

Может быть использовано для сверления неглубоких отверстий (глубиной примерно до половины диаметра сверла). При сверлении более глубоких отверстий увеличивается риск застревания сверла.

Специальное сверло

Отличается от обычного спирального сверла следующим:

Диаметр сверла уменьшен по всей длине тела сверла, кроме начальных 3мм сразу за режущей кромкой сверла.

Зазор режущей кромки увеличен до 25°-30° (вместо обычных 12°-15°).

На сверлах диаметром 25 мм и больше может быть уменьшена стандартная толщина перемычки сверла.

Скорость сверления должна быть такой же, как при сверлении мягкой стали, чтобы края отверстий получались гладкими.

Перовое сверло

Дает более гладкие поверхности, снижает риск образования заусенцев, когда сверло проходит противоположную сторону.

Глухие отверстия

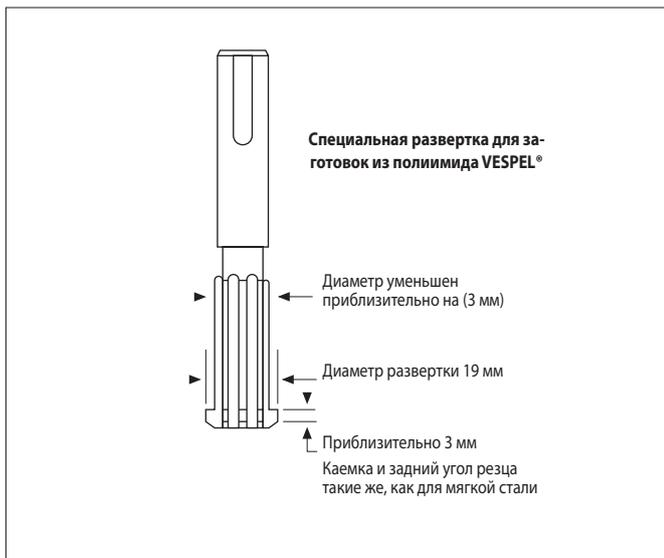
Глубокие глухие отверстия трудно делать с жесткими допусками. Если возможно, используйте сверла для грубого сверления. Можно использовать ружейные сверла с жидким охлаждением под высоким давлением для удаления стружки.

Нарезание резьбы

В заготовках из полиимида VESPEL® можно нарезать резьбу при помощи обычных металлорежущих инструментов. Не допускайте нагревания материала до такой степени, когда термическое расширение может покорежить резьбу. Если возможно, используйте однолезвийный твердосплавный инструмент и составную подачу под углом 30°. Глубина подачи не должна превосходить 0,13 мм при первом прохождении. Затем нужно постепенно подачу снижать до 0,05 мм на одно прохождение до завершения обработки. Хотя эта процедура добавит дополнительные технологические циклы при изготовлении детали, качество нарезанной резьбы при этом повышается.

Зенковка

Как и при сверлении, зенковать детали из полиимида VESPEL® нужно с помощью специально изготовленного инструмента, например, как на рисунке ниже. Использование специального инструмента поможет избежать застревания. Из-за нагревания детали можно рассверливать отверстия на диаметр 0,025-0,05 мм больше желаемого. Для достижения жестких допусков лучше использовать растачивание. Необходимо оставлять запас не менее 0,4 мм, который должен быть потом убран растачиванием. При растачивании и развертке глубоких отверстий можно использовать такие же инструменты, как при работе с мягкой сталью.



Шлифовка

Заготовки из полиимида VESPEL® можно шлифовать на плоскошлифовальном и бесцентровом шлифовальном станке или абразивном круге. Скорость грубой шлифовки может быть около 24 м/мин и примерно в два раза меньше при доводке на плоскошлифовальном станке. Шлифовальный круг 32A46-H8VG диаметром 305 мм хорошо работает с этим материалом на скоростях 900-1200 м/мин. Шлифовальный круг должен быть покрыт абразивной алмазной крошкой, как при доводке стали.

Прутки и небольшие трубы из полиимида VESPEL® могут подготавливаться для обработки на патронном или винторезном станке предварительной шлифовкой на бесцентровом шлифовальном станке. Обычно для этого достаточно таких же инструментов, как для шлифования стали, при обильном жидкостном охлаждении.

Предостережение: Не позволяйте материалу перегреваться до такой степени, что его нельзя взять голыми руками.

Полировка

Детали из полиимида VESPEL® можно полировать до блеска на обычном войлочном круге. Никаких специальных мер предосторожности не требуется, помимо обычных для такой операции.

Удаление «заусенцев»

«Заусенцы» удаляют так же, как и с металлических деталей. Детали из полиимида VESPEL® можно прокручивать в вибрационных или поворотных барабанных машинах для удаления «заусенцев», добавляя абразивные вещества, очищающие средства и воду.

Окончательная доводка

Чтобы детали из полиимида VESPEL® не вбирали алмазную крошку или оксиды алюминия, нужно выполнять следующие процедуры доводки плоских, хорошо отполированных поверхностей:

- Используйте влажную или сухую наждачную бумагу (например, 600-grit Norton Tufbak Durite) которая удерживает абразивную пыль.
- Используйте гранитную выверочную плиту или эквивалент для контроля за сохранением плоскости поверхности.
- Можно использовать легкое машинное масло для скольжения.

- Для окончательной доводки подходит абразивная ткань Crocus Cloth.
- Хорошее качество доводки поверхностей из полиимида VESPEL® шлифования обеспечивается абразивной бумагой Kraft или планшетной бумагой.

Меры безопасности при механической обработке смолы SP211 с наполнителем TEFLON®

Детали и стандартные заготовки из смолы SP211 содержат 10% наполнителя TEFLON® (по весу). TEFLON® - это политетрафторэтилен (ПТФЭ), его частицы могут попадать в воздух во время машинной обработки, поэтому нужно следовать следующим правилам:

- Во время обработки или резки используйте эмульсию для охлаждения и смазки режущих инструментов или водорастворимое охлаждающее масло. Не работайте со смолой SP211 в плохо вентилируемых помещениях.
- Не держите сигареты и курительные трубки в машинном цехе, потому что частицы политетрафторэтилена из воздуха могут загрязнить их.
- Старайтесь не вдыхать пыль и тщательно мойте руки перед курением и едой.

См. таблицу с данными о безопасности материалов в Приложении С.

Измерение деталей

Хотя для измерения деталей из полиимида VESPEL® можно использовать те же инструменты, что и для металлических деталей, методы измерения различаются в силу того, что детали из пластмассы могут больше изгибаться под давлением измерительного инструмента. Перед измерением деталь нужно привести к нормальным условиям по ASTM D616, Процедура AA: образцы должны держаться в стандартной лабораторной атмосфере (температура 23°C, относительная влажность 50%±5%) не менее 40 часов.

Микрометр

Измеряя внешний диаметр кольца, не используйте микрометр как обычно (крутя винт, пока не почувствуешь плотный контакт или пока трещотка не будет прокручиваться), поскольку такое давление уже может деформировать деталь и привести к неправильному измерению. Вместо этого нужно установить микрометр на минимальное значение допуска и попытаться провести деталь сквозь зазор. Таким образом, микрометр используется как проходной калибр. Деталь должна проходить сквозь зазор без приложения усилия. Для того чтобы тонкие кольца не изгибались, во внутренний диаметр рекомендуется вставить заглушку подходящего размера.

Цилиндрический калибр

Измеряя размеры отверстий цилиндрическим калибром, нельзя прилагать усилие, продавливать калибр сквозь отверстие, поскольку при этом усилие калибр можно протолкнуть сквозь отверстие, примерно на 0,1 мм уже размера калибра (в зависимости от геометрии детали). В целом, цилиндрические калибры лучше подходят для измерения внутренних диаметров, чем микрометры, которые могут деформировать деталь. Лучше всего использовать пневматический калибр.

Большей точности измерений можно добиться с помощью оптических приборов или контактных датчиков.

Прокаливание

Прокаливание, или высокотемпературная обработка полиимидных смол серии VESPEL® требуется для снижения механических напряжений, внесенных в материал в процессе изготовления и/или машинной обработки. Ослабление напряжений происходит во время нагревания материала до такой температуры, когда молекулярная структура может сдвинуться или измениться в зависимости от состояния высокого напряжения к состоянию низкого напряжения. Обычно такое изменение сопровождается уменьшением объема материала.

Разного рода механическое напряжение, присутствующее в материале VESPEL®, может возникать из-за неравномерности процесса обработки изделия или в результате появления полостей или стержней. Целью прокаливания является постепенное нагревание до некоторой температуры выше ожидаемой максимальной эксплуатационной температуры, затем выдерживание при этой температуре для достижения равномерного прогрева и медленное охлаждение, чтобы снизить возможность возникновения термических напряжений.

Поскольку материал VESPEL®, как и большинство полиимидных смол, подвергается некоторому термическому или окислительному разложению при температурах выше определенного предела, прокаливать детали следует либо в вакууме, либо в печи, продуваемой инертным газом.

Процедура прокаливания

Примечание: всегда испытывайте эту процедуру на одной или нескольких деталях, чтобы убедиться, что для изменения размера есть достаточный запас материала.

После прокаливания деталь может нагреваться до максимальной эксплуатационной температуры без дополнительных изменений размеров.

1. Обработайте деталь из полиимида VESPEL® до размеров, на 0,5-1,5 мм превышающих окончательные.
2. Поместите деталь в вакуумную печь или в печь, продуваемую инертным газом.
3. Нагревайте материал со скоростью 1-1,5°C в минуту до температуры, которая на 20°C превышает ожидаемую максимальную эксплуатационную температуру. Мы советуем поддерживать минимальную температуру прокаливания не ниже 150°C для любых деталей с ожидаемой эксплуатационной температурой 120°C и ниже.
4. Выдерживайте материал при максимальной температуре в течение двух часов (детали с минимальным размером более 25 мм должны выдерживаться три часа).
5. Выключите печь и постепенно дайте материалу остыть до 70°C в закрытой печи, прежде чем вынимать его.
6. Было показано, что лучше всего проводить прокаливание непосредственно перед окончательной обработкой детали. Многократное прокаливание не требуется.
7. Все указанные температуры нужно соблюдать с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$.

Бляшки, прутки, трубы и бруски по характеру производства должны подвергаться прокаливанию, если допустимые допуски размеров составляют менее 3% и ожидается воздействие высоких температур. Любая заготовка или деталь, подвергавшаяся машинной обработке, требует прокаливания для выполнения жестких допусков.

Не рекомендуется проводить прокаливание при температурах выше 370°C. При таких температурах может произойти термическое повреждение и температурное расширение, вероятно, окажется больше, чем сжатие детали в результате снятия механических напряжений.

Соединений деталей

Для соединения деталей из полиимида VESPEL® друг с другом и с другими пластмассами, металлами и эластомерами можно использовать различные связующие материалы. Выбор связующего определяется конкретным применением, особенно температурой конечного использования. Для достижения наилучшего результата необходимо обеспечить чистоту соединяемых поверхностей и строго соблюдать инструкции производителя связующего материала. Соединяемые поверхности должны иметь примерно совпадающие контуры, поскольку оптимальная адгезия требует тонкого и равномерного связующего слоя.

Типы связующих

Эпоксидные, фенольные и полиимидные связующие успешно применялись для склеивания деталей из полиимида VESPEL®.

Подготовка поверхностей деталей из полиимида VESPEL® для соединения

Допускается только механическое протравливание абразивным шлифованием деталей из полиимида VESPEL®.

Загрязнение поверхностей маслами и грязью можно удалять растворителями. Рекомендуется промывать детали в потоке перхлорэтилена.

Комбинированное формование и нанесение покрытий

Поскольку полиимид VESPEL® не плавится, при изготовлении сложных или больших деталей можно заформовать вставку из материала VESPEL® в другой конструкционный полимер методом литья под давлением.

Используйте превосходные свойства полиимида VESPEL® там, где это необходимо, а остальная окружающая часть детали может быть изготовлена из другого полимера литьем под давлением. Такое решение может оказаться самым выгодным для Ваших технических условий.

Высокоэффективные детали из полиимида VESPEL® можно покрывать, например материалом TEFLON®, для придания деталям дополнительных специфических свойств.

Устойчивость к воздействию радиации

Как мы покажем в этом кратком обзоре, детали из полиимида VESPEL® могут работать в условиях воздействия различных видов радиоактивных излучений, даже при относительно больших дозах радиации. При дозах до 1×10^8 Рад наблюдались лишь небольшие потери веса, прочности на разрыв и относительного удлинения при разрыве, поэтому детали из полиимида VESPEL® могут сохранять свои первоначальные свойства даже под воздействием гамма-излучения или электронного луча.

Работа с радиацией

В ряде технологических и промышленных процессов могут присутствовать источники радиации различных типов. При высоких уровнях радиации часто необходимо дистанционно управлять процессами или полностью автоматизировать их, чтобы не подвергать опасности персонал. При разработке автоматизированного и дистанционного оборудования используются материалы, которые должны быть устойчивы к воздействию радиации.

Хотя металлы хорошо работают в статических конструкциях, их необходимо смазывать, а смазка может стать источником механических загрязнений, которые отрицательно влияют на работу металлических подшипников, втулок и других движущихся частей. Поэтому движущиеся части механизмов и оборудования, используемого при производстве радиоактивных химикатов или управлении топливными стержнями реактора, могут производиться из самосмазывающихся деталей из полиимидов серии VESPEL® SP. В данном случае полиимиды могут превосходить по своим свойствам металлы.

Воздействие радиации на эксплуатационные характеристики деталей из полиимида VESPEL® SP описывается ниже.

Испытания

Чтобы определить, насколько материалы сохраняют свои функциональные свойства после облучения, определялись следующие прочностные параметры брусков, изготовленных прямым формованием из полиимида VESPEL® (SP1, SP21 и SP22):

1. относительная потеря веса;
2. изменение прочности на разрыв;
3. изменение относительного удлинения при разрыве по сравнению со случайно выбранными брусками, не подвергавшимися облучению.

Гамма-излучение: мощность облучения составляла $3,8 \times 10^6$ Рад/ч из источника кобальт 60. Время экспозиции: 16 мин., 2,6 ч и 26,3 ч. Суммарные дозы 10^6 , 10^7 и 10^8 Рад, соответственно.

Электронное излучение: генератор Ван-де-Граафа с напряжением 2,0 МВ создавал пучок электронов с мощностью излучения $4,0 \times 10^6$ Рад/ч. Время экспозиции 1,6 мин., 80 мин и 2,7 ч. Суммарные дозы 10^6 , 5×10^7 и 10^8 Рад, соответственно.

Нейтронное излучение: Пучок нейтронов плотностью 5×10^{13} /см²/с облучал образцы в течение 100 и 150 часов. Мощность сопутствующего гамма-излучения при этом составляла $1,2 \times 10^8$ Рад/ч.

Воздействие гамма-излучения на детали из полиимида VESPEL®

Потеря веса

При уровнях гамма-облучения до 1×10^8 Рад включительно образцы из полиимидной смолы VESPEL® теряли в весе менее 1,0%.

Прочность на разрыв

Образцы из полиимидной смолы VESPEL® потеряли менее 6,5% первоначальной прочности на разрыв после облучения дозой до 1×10^8 Рад.

Относительное удлинение

Относительное удлинение при разрыве всех трех полиимидных композиций VESPEL® изменилось незначительно. Самое большое изменение составило 19,2% по сравнению с контрольной выборкой и соответствовало максимальной дозе облучения.

Воздействие электронного излучения на детали из полиимида VESPEL®

Потеря веса

При облучении в пучке электронов с дозами до 1×10^8 Рад включительно образцы из полиимидной смолы VESPEL® теряли в весе менее 2,0%.

Прочность на разрыв

Образцы из полиимидной смолы VESPEL® потеряли менее 4,5% первоначальной прочности на разрыв после облучения дозой до 1×10^8 Рад.

Относительное удлинение

Относительное удлинение при разрыве всех трех полиимидных композиций VESPEL® изменилось незначительно. Самое большое изменение составило 15,0% по сравнению с контрольной выборкой и соответствовало максимальной дозе облучения в электронном пучке.

Воздействие нейтронного излучения на детали из полиимида VESPEL®

Хотя ни один из испытывавшихся образцов не увеличился в размерах и заметно не искривился, после воздействия пучка нейтронов разрывная прочность была существенно потеряна. Поэтому перед применением деталей из полиимида VESPEL® в условиях нейтронного облучения мы советуем Вам проконсультироваться с инженером по продажам материалов VESPEL®, а также провести специальные испытания на устойчивость к воздействию радиационного облучения.

Втулки и подшипники

Чем раньше вы задумаетесь о применении материала VESPEL[®], тем более эффективными по затратам станут Ваши конструкторские решения

Инженеры и торговые представители отдела VESPEL[®] компании DuPont готовы помочь Вам наиболее эффективно использовать детали из полиимида VESPEL[®]. Просто напишите в ближайший к Вам офис продаж VESPEL[®] компании DuPont или позвоните менеджеру по продажам материалов VESPEL[®].

Ваше производство и материал VESPEL[®]

Полиимидные подшипники из материала DuPont™ VESPEL[®] используются уже более 20 лет, удлинняя срок работы оборудования и снижая затраты на техобслуживание по сравнению с применением обычных подшипников.

Полиимидные подшипники VESPEL[®] являются наиболее экономически эффективным решением во многих ситуациях, поскольку они прочные, легкие, устойчивы к износу и ползучести даже при высоких температурах. Они могут работать лучше, чем детали из металлов или других пластиков, в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Данный раздел Руководства для инженеров-конструкторов поможет Вам выбрать именно те полиимидные подшипники VESPEL[®], которые лучше всего подходят для Ваших нужд. В этом разделе Вы найдете:

- общую информацию о конструкции подшипников;
- метод определения нагрузки давление-скорость (PV) в Вашем механизме;
- руководство по выбору правильной полиимидной смолы для Ваших PV-нагрузок;
- общие соображения относительно использования полиимидных подшипников VESPEL[®] в Ваших конструкциях;
- Пример конструкторской задачи на расчет подшипников.

Отличие подшипников из полиимида VESPEL[®] от всех прочих

Способность подшипника работать в данном механизме, как правило, зависит от следующих факторов:

- рабочей среды, включая температурный режим и смазку;
- нагрузки или давления на поверхность подшипника;
- скорости скольжения прилегающих поверхностей относительно подшипника;
- жесткости и гладкости прилегающих поверхностей;
- характера трения в материале подшипника;
- толщины материала подшипника в сочетании со способностью материала рассеивать тепло трения.

Детали из полиимидных смол DuPont™ VESPEL[®] хорошо работают со смазкой или в отсутствии смазки при таких условиях, при которых разрушаются другие пластмассы и происходит сильный износ большинства металлов. Полиимидные подшипники VESPEL[®] снижают или полностью устраняют проблемы стирания, коррозии, усталости и износа, от которых страдают подшипники из традиционных материалов, особенно когда работают без смазки.

Полиимидные подшипники VESPEL[®] могут выдерживать большие нагрузки давление-скорость (PV), чем другие высокоэффективные конструкционные пластмассы. Кроме этого, полиимидные подшипники VESPEL[®] превосходят другие подшипники по своим свойствам в более широком диапазоне температурных режимов и давлений, поскольку сохраняют сопротивление ползучести, устойчивость к стиранию и прочность. Их успешная работа была показана в таких сложных средах, как:

- атмосфера воздуха и инертных газов, разогретая до 370°C;
- гамма- и электронное излучение;
- глубокий вакуум (10^{-10} торр);
- гидравлические жидкости и авиационное топливо;
- жидкий водород.

В отличие от обычных шарикоподшипников, игольчатых и роликовых подшипников, полиимидные подшипники VESPEL[®]:

- не нуждаются во внешней смазке;
- работают при температурах, при которых смазки разлагаются;
- хорошо работают в загрязненной среде;
- могут снижать шум, вес и себестоимость оборудования.

По сравнению с бронзовыми, латунными и пористыми металлическими подшипниками, полиимидные подшипники VESPEL[®]:

- продлевают время жизни других деталей, устраняя истирание металла по металлу;
- противостоят сочетанию высокой температуры, высокого давления и больших поверхностных скоростей, что невозможно для металлов без смазки;
- сопротивляются ползучести и расплыванию;
- устраняют проблемы потери смазки в присутствии бумажной пыли или пуха.

По сравнению с другими полимерными подшипниками, полиимидные подшипники VESPEL[®]:

- работают при таких температурах, давлениях и поверхностных скоростях, при которых не выдерживают другие пластмассы;
- лучше сопротивляются ползучести и расплыванию;
- могут обрабатываться на станках как латунь, но с гораздо меньшими допусками по размерам

Как выбрать материал для подшипников

Главным фактором при выборе подшипников является соотношение давление-скорость (PV)

Соотношение PV – это произведение нагрузки или давления (P) на скорость скольжения (V). Пластмассовый подшипник при увеличении соотношения PV в какой-то момент разрушается; при этом говорят, что он достиг своего предела PV. Разрушение подшипника обычно можно заметить по резкому возрастанию скорости износа материала подшипника.

До тех пор пока не исчерпана механическая прочность материала подшипника, предел PV определяется в основном температурой поверхности подшипника. Поэтому все факторы, которые влияют на эту температуру: коэффициент трения, теплопроводность, смазка, температура внешней среды, зазор между валом и подшипником, жесткость и гладкость прилегающих поверхностей – также влияют на величину предела PV для данного подшипника.

Первым шагом в выборе материала для изготовления подшипника является определение того, будет ли превышен предел PV для данного материала в Вашем случае. Обычно следует определять предел PV с большим запасом, поскольку реальные эксплуатационные условия часто оказываются более тяжелыми, чем при испытаниях материалов на производстве.

Оценка соотношения PV

1. Сначала определите статическое давление на единицу площади (P), которому будет подвергаться подшипник при работе.

P = давление, МПа

W = статическая нагрузка, Н

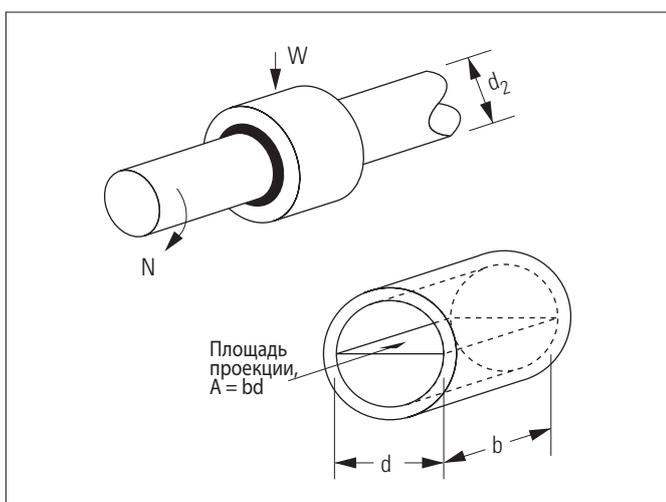
d = внутренний диаметр подшипника (ID), мм

b = длина подшипника, мм

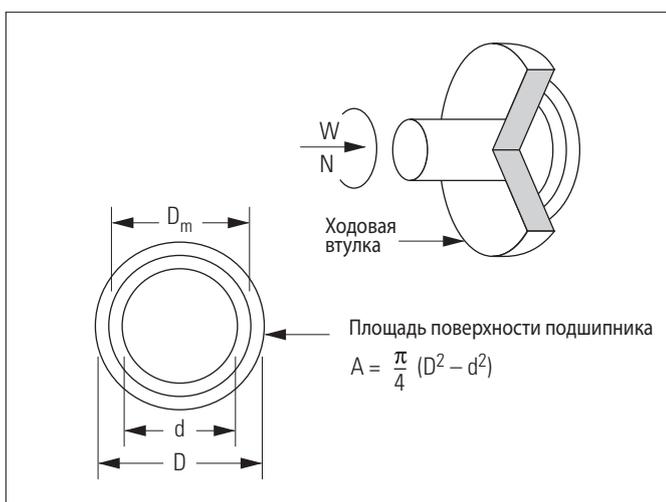
N = скорость вращения, об/мин

D = внешний диаметр подшипника (OD), мм

Для подшипников скольжения: $P = W / (d \times b)$



Для упорных подшипников: $P = 4W / \pi (D^2 - d^2)$



Для обоих типов подшипников давление (P) при комнатной температуре не должно превышать указанные ниже значения:

Допустимые значения статического давления на подшипники

Полиимидная композиция	SP1	SP21		
------------------------	-----	------	--	--

Процесс изготовления	Машинная обработка	Прямая формовка	Машинная обработка	Прямая формовка
----------------------	--------------------	-----------------	--------------------	-----------------

P, МПа	51	33	46	34
--------	----	----	----	----

Полиимидная композиция	SP22	SP211		
------------------------	------	-------	--	--

Процесс изготовления	Машинная обработка	Прямая формовка	Машинная обработка	Прямая формовка
----------------------	--------------------	-----------------	--------------------	-----------------

P, МПа	41	26	37	28
--------	----	----	----	----

2. Второй шаг – вычисление скорости (V) скольжения подшипника относительно прилегающей поверхности:

	Подшипник скольжения	Упорный подшипник
--	----------------------	-------------------

Непрерывное вращение	$V = \pi (dN)/60$	$V = \pi (D_m N)/60$
-----------------------------	-------------------	----------------------

Колесное движение	$V = \pi (dN) (\theta/180)/60$	$V = \pi (D_m N) (\theta/180)/60$
--------------------------	--------------------------------	-----------------------------------

где:

N = скорость вращения, об/мин или циклов в минуту

$D_m = (D + d)/2$, м

θ = угол между крайними положениями при качении, град.

V = поверхностная скорость, м/с

3. Последний шаг – вычисление соотношения PV:

PV (МПа · м/с) = P (МПа) × V (м/с)

Пределы PV для подшипников без смазки

Таблица 6 содержит максимальные пределы PV для деталей из полиимида VESPEL® и некоторых других материалов, в отсутствие смазки и при постоянном движении. Хорошо смазанные детали из полиимида VESPEL® могут выдерживать соотношения давление-скорость приблизительно до 40 МПа · м/с.

Таблица 6 Рекомендуемые пределы PV **

Материал	Наполнитель	МПа · м/с	Максимальная контактная температура (°C)
SP21	15% графита	12	395
SP22	40% графита	12	395
SP211	15% графита 10% ПТФЭ	3,6	260
ПТФЭ *	ненаполненный	0,064	260
ПТФЭ *	15–25% стекла	0,45	260
ПТФЭ *	25% углерода	0,71	260
ПТФЭ *	60% бронзы	0,66	260
Нейлон	ненаполненный	0,14	150
Ацеталь	ПТФЭ ненаполненный	0,27 0,12	120

* При 0,5 м/с.

** Эти рекомендуемые значения предлагаются только для справки. Пределы PV могут меняться для любого материала с различными сочетаниями давления и температуры, а также в зависимости от других условий проведения испытаний. Подробная информация содержится в литературе производителя.

Проектирование подшипников из полиимида VESPEL®

Влияние поверхностной температуры на характеристики износа

Соотношение давление-скорость – очень полезный параметр для определения пригодности данного материала для изготовления подшипников. Однако для адекватной характеристики материала для подшипников недостаточно знать только давление и скорость скольжения, или соотношение PV. Температура, геометрия механизма и качество прилегающих поверхностей также играют большую роль при износе подшипников.

Из трех последних факторов температура обычно наиболее важна, поскольку она не только влияет на коэффициент трения, но также определяет подходящие значения PV. Характеристики износа полиимидных подшипников VESPEL® будут в допустимых пределах даже при высоких значениях PV, если обеспечить достаточное охлаждение. Наоборот, при любом значении PV износ будет сильным при слишком высоких температурах внешней среды. Износостойкость есть свойство механической системы, зависящее от обоих трущихся материалов (трибологическая система), и знать только свойства самого полиимидного подшипника VESPEL® при температурах ниже предельной недостаточно. Только экспериментально определяемый коэффициент износа может адекватно характеризовать износостойкость трущейся пары. Этот коэффициент выводится из уравнения для объема истертого материала за единицу времени на единицу нагрузки и поверхностной скорости.

$$v = f(KFVT)$$

где:

v = объем истертого материала, мм³

K = коэффициент износа, мм³/Нм

Зависит от шероховатости трущихся поверхностей, жесткости, температуры и условий окружающей среды

F = поддерживаемая нагрузка, Н

T = время, с

V = скорость, м/с

Для плоских поверхностей это уравнение видоизменяется следующим образом:

$$X = f(KPVT)$$

где:

X = глубина износа, мм

P = давление, МПа

Рабочие пределы

Скорость износа подшипников из полиимида SP1 без смазки, который работает на открытом воздухе, прямо пропорциональна давлению и скорости, если температура поверхности подшипника не превышает 395°C (см. рис. 37). Коэффициент пропорциональности (который мы называем коэффициентом износа) остается постоянным в большом диапазоне условий работы подшипника, до тех пор пока температура не превосходит указанного критического значения – температуры перехода от одного вида изнашивания к другому. Ниже этой температуры изнашивание остается умеренным. Однако коэффициент износа начинает возрастать, как только температура превысит 395°C, и становится очень высоким при температурах около 540°C. Выше этой температуры полиимидная смола SP уже не противостоит нагрузке и начинается пластическая деформация. Однако если деталь из полиимида SP подвергается такой высокой температуре в течение короткого времени, то после охлаждения деталь обычно восстанавливает свою функциональность.

Снижение износостойкости при повышенных температурах зависит от термической устойчивости полиимида, так что мы ожидаем, что температура перехода увеличится до 540°C в атмосфере инертного газа или в вакууме.

На рисунке 38 изображена кривая предельного значения давление-скорость при поверхностной температуре 395°C и трении подшипника из полиимида SP21 о мягкую сталь при температуре внешней среды 23°C. Обратите внимание на то, что предел PV меняется от 1 МПа · м/с при давлении 0,07 МПа до 12 МПа · м/с при давлении 7 МПа.

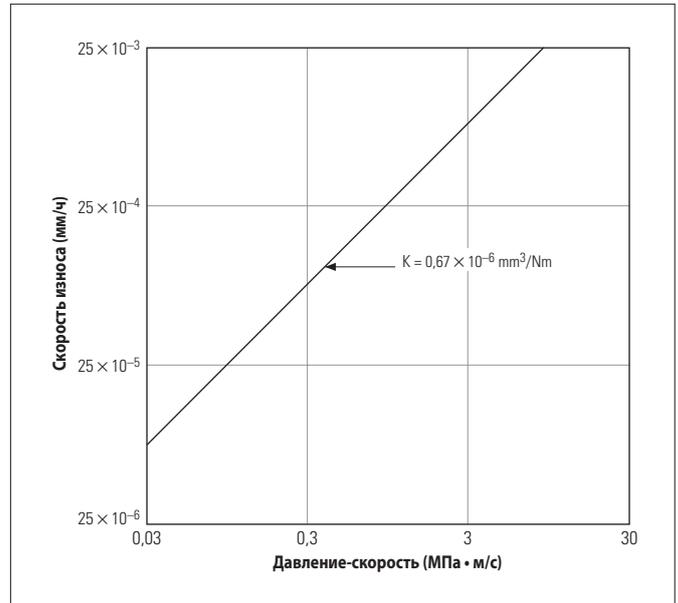


Рис. 37 Зависимость скорости износа от соотношения давление-скорость, трение упорного подшипника из полиимида SP21 без смазки об углеродистую сталь

$P = 0,07-22$ МПа

$V = 0,025-5,0$ м/с

Поверхностная температура ниже 395°C

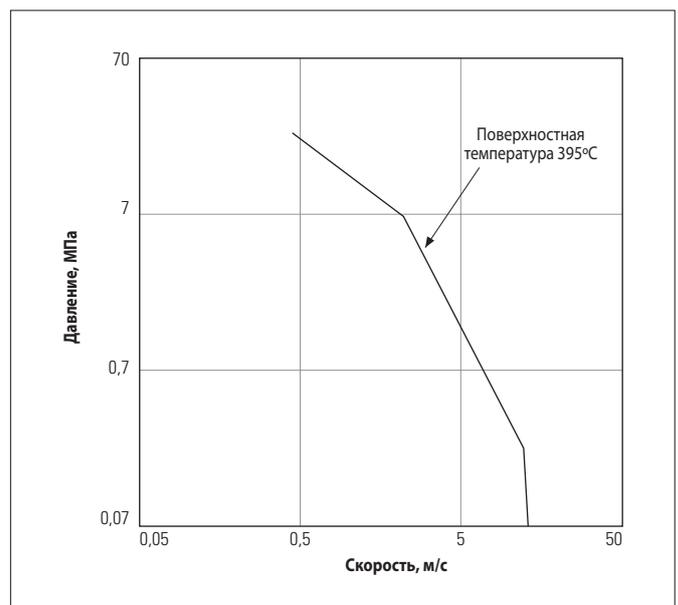


Рис. 38 Предел давление-скорость при трении подшипника из полиимида SP21 без смазки об углеродистую сталь

Особенности трения полиимидных смол

Динамический коэффициент трения зависит от температуры, давления и скорости. Типичные коэффициенты трения для различных полиимидных композиций приведены в Таблице 7.

Коэффициенты трения для полиимидных композиций с наполнителями претерпевают резкие изменения при температуре перехода около 150°C, как показано на рис. 39. Ниже температуры перехода фрикционные свойства полиимида подобны поведению нейлона 66, но выше 150°C силы трения резко снижаются и в диапазоне температур от 200°C до 540°C коэффициент трения не зависит от температуры. Температура перехода коэффициента трения не зависит от температуры перехода от одного вида изнашивания к другому. Скачки коэффициента трения и скорости износа не столь значительны для полиимида марки SP211 (рис. 40).

Инженер-конструктор должен учитывать возрастание сил трения в результате двух независимых явлений, которые могут наблюдаться при пуске механизма. Первое явление – переход слоя полиимидной смолы/наполнителя на прилегающую поверхность. Второе явление – температурный переход для полиимидных смол. Во время повторного пуска в рабочих условиях прилегающей поверхности нет необходимости прирабатываться в новый слой, но температурный переход обратим, и будет наблюдаться при каждом следующем пуске.

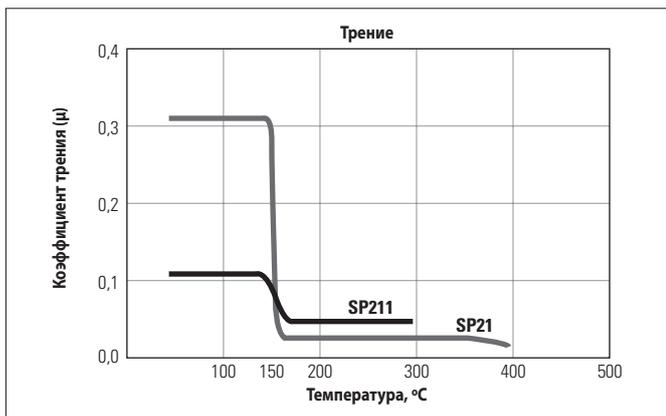


Рис. 39 Коэффициенты трения полиимида SP21 и SP211 о среднеуглеродистую сталь без смазки

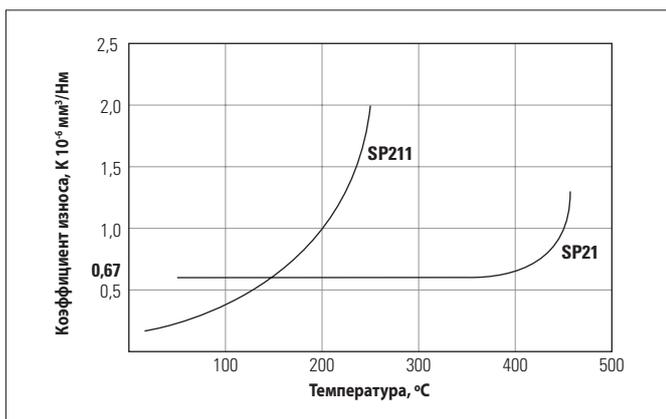


Рис. 40 Коэффициенты износа полиимида SP21 и SP211 при трении о среднеуглеродистую сталь без смазки

Таблица 7. Типичные коэффициенты трения – испытания упорных подшипников без смазки

Условия измерений	Полиимидная композиция			
	PV (МПа·м/с)	SP21	SP22	SP211
Статическое трение		0,30	0,27	0,20
P = 0,34 МПа V = 2,54 м/с	0,86	0,24	0,20	0,12
P = 0,69 МПа V = 0,51 м/с	0,35	0,35	–	0,24
P = 0,69 МПа V = 1,52 м/с	1,05	0,17	0,21	–
P = 0,69 МПа V = 5,08 м/с	3,5	0,07	0,09	0,08
P = 6,90 МПа V = 1,6 м/с	11	0,04	–	–

Прилегающий материал и качество обработки поверхности

Фрикционные свойства деталей из полиимида VESPEL® могут сильно зависеть от твердости прилегающего материала и качества обработки поверхности. Степень изнашивания подшипников без смазки может снижаться при увеличении жесткости и уменьшении шероховатости прилегающей поверхности. Как правило, шлифовка поверхности предпочтительнее обточки на токарном станке. Тщательная шлифовка часто приносит очень хорошие результаты: шлифовать поверхность нужно в направлении движения подшипника относительно прилегающей поверхности. DuPont рекомендует доводить шероховатость поверхности до 0,4 μm (Ra) и твердости HR_c = 55.

Сталь и литейный чугун, как правило, являются очень хорошими прилегающими поверхностями для подшипников из полиимидов VESPEL® всех марок.

Очень хорошие фрикционные свойства имеют используемые в подшипниках и трансмиссиях материалы 100 Cr-6 и 20 Mn Cr-5.

Алюминий и цинк не столь хороши в качестве прилегающих материалов для пластиковых подшипников, потому что мягкость этих металлов может приводить к их быстрому изнашиванию. При использовании алюминия его нужно закалять или, что более предпочтительно, анодировать.

Литьевой алюминий с большим содержанием кремния очень быстро стирает детали из материала VESPEL®.

Для работы без смазки в контакте с мягкими металлами, такими как бронза и алюминий, недавно была создана новая полиимидная композиция SP211.

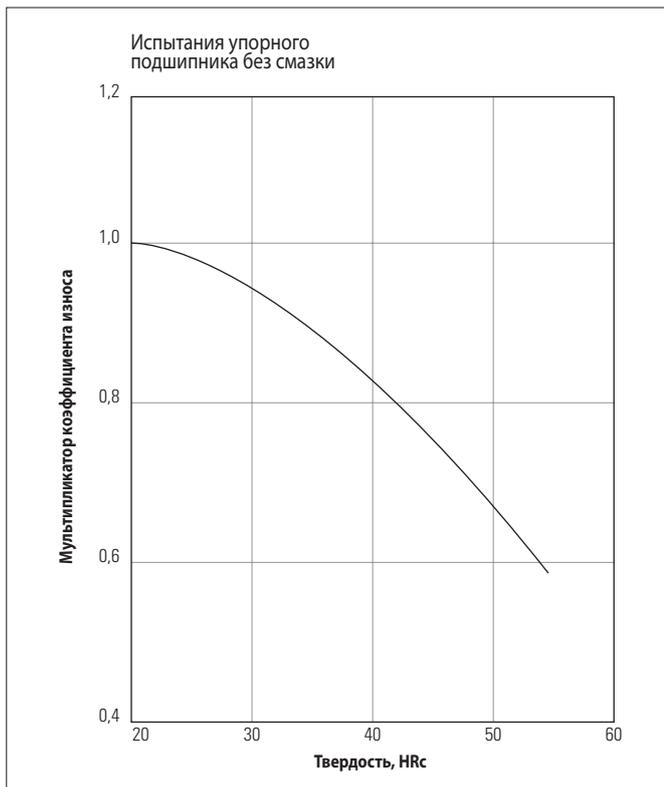


Рис. 41 Влияние твердости прилегающего материала на износ

Рис. 41 и 42 иллюстрируют влияние твердости и качества обработки прилегающей поверхности на износ подшипников.

Пластик является плохим прилегающим материалом для полиимидных подшипников VESPEL®. Использовать пластики можно лишь при невысоких значениях соотношения давление-скорость (PV). Мягкость поверхности пластиков может привести к быстрому износу. Кроме того, пластики довольно плохо проводят тепло, в результате чего при трении пластикового подшипника по пластиковой поверхности он нагревается больше, чем при трении по металлу. Поэтому трущиеся пары металл-пластик имеют более высокие значения предела PV, чем пары пластик-пластик.

Смазка и другие факторы, учитываемые при проектировании подшипников

При обсуждении необходимости смазки подшипников следует оценить следующие факторы:

- Одноразовая смазка, состоящая из первоначальной консистентной или сухой смазки, обычно снижает износ при обработке поверхностей и улучшает общую износостойкость.
- Смазка подшипников может увеличить их предел PV, снижая коэффициент трения и помогая выводить продукты износа. Циркулирующая смазка может еще больше увеличить предел PV, если охлаждать подшипник.
- Смазка химически совместимой жидкостью для смачивания подшипников VESPEL® может снизить как трение, так и скорости износа. Величина этого снижения будет зависеть от толщины жидкостной пленки. Большей толщины можно достичь, увеличивая вязкость жидкости и поверхностную скорость. При увеличении давления на поверхность подшипника толщина жидкостной пленки, наоборот, снижается. Геометрия трущейся пары также влияет на трение. Даже тонкие пленки смазывающей жидкости могут снизить скорости износа (по сравнению с износом в сухих условиях) в 10 раз и более. Толстые пленки могут полностью разделить твердые прилегающие поверхности и теоретически снизить износ до пренебрежимо малых величин.

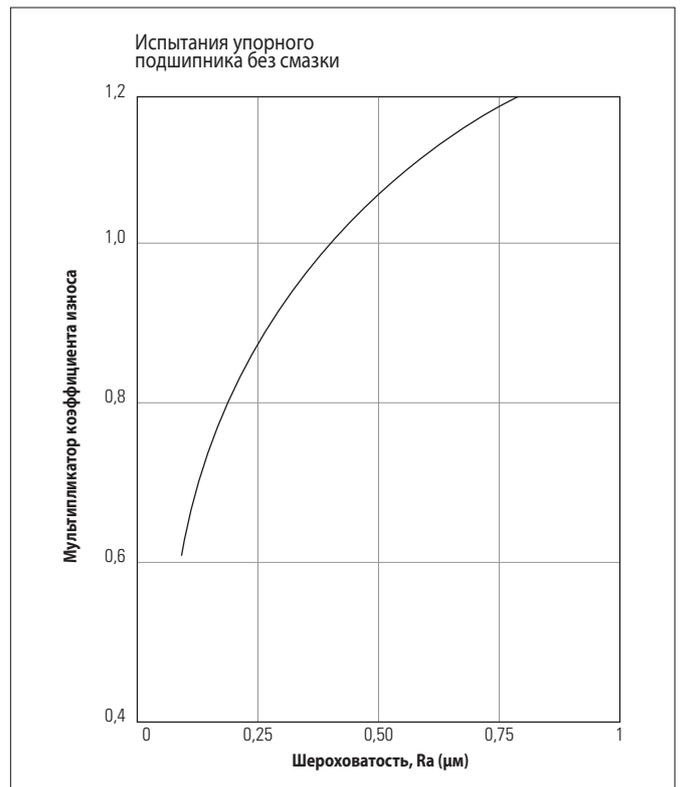


Рис. 42 Влияние качества обработки поверхности прилегающего материала на износ

- Фрикционные свойства смазываемого подшипника при образовании тонкой пленки жидкой смазки определяются как свойствами материала подшипника, так и свойствами смазки. При образовании толстых пленок смазывающей жидкости трение будет зависеть только от свойств смазки.

Таблица 8 Коэффициент термического расширения (αSP)

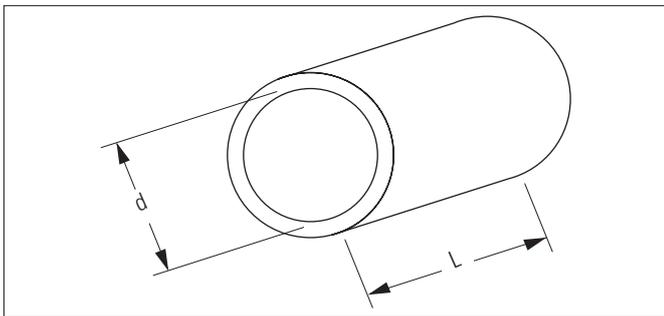
Полиимидная композиция	SP1		SP21	
	Машинная обработка	Прямое формование	Машинная обработка	Прямое формование
αSP 10 ⁻⁶ м/м/°C	54	50	49	41

SP22		SP211		ST2010	ST2030
Машинная обработка	Прямое формование	Машинная обработка	Прямое формование	Машинная обработка	Машинная обработка
38	27	54	41	48	32

- Подшипники без смазки должны иметь специальные проточки на поверхности для удаления продуктов износа из области контакта. Если используется смазка, то проточки могут помочь доставлять смазку в область контакта. Перед нарезкой канавок нужно оценить, как они повлияют на давление на подшипник.
- Вода не эффективна для смазки тонкой пленкой или граничной смазки полиимидных подшипников VESPEL[®], поскольку она не смачивает смолу SP. Наоборот, вода может отрицательно повлиять на скорость износа сухих подшипников VESPEL[®]. Однако периодическое случайное загрязнение подшипников водой не должно вызывать каких-либо проблем.
- Продувка сухих подшипников из полиимида VESPEL[®] азотом может снизить скорости износа до менее чем 20% от соответствующей величины на воздухе. Кроме того, работа трущейся пары в атмосфере азота может увеличить температуру перехода от одного вида изнашивания к другому по крайней мере на 50°C по сравнению с работой в воздухе.
- Для работы в грязных средах необходимо использовать уплотнители или продувку, чтобы предотвратить загрязнение поверхностей подшипников.

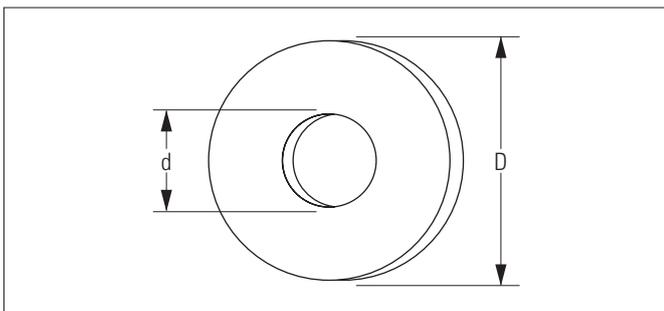
Пропорции

Подшипники скольжения: Для оптимальной работы подшипников скольжения из полиимида VESPEL[®] отношение длины к диаметру (l/d) должно находиться в пределах $1/2 - 3/2$. Вместо одного более длинного подшипника целесообразно вставить два коротких с зазором между ними. Уменьшение отношения l/d приводит к:



- более эффективному удалению продуктов износа;
- меньшей чувствительности к отклонению оси и неправильной центровке;
- лучшему отведению тепла;
- экономии затрат на изготовление подшипников.

Упорные подшипники: Для оптимальной работы упорных подшипников из полиимида VESPEL[®] отношение внешнего диаметра ко внутреннему (D/d) не должно превосходить 2. Значения D/d больше 2 могут вызвать перегрев внешнего края, проблемы с захватом продуктов износа и с параллельностью плоскостей.



Зазор между валом и подшипником скольжения

Хотя подшипники из полиимида VESPEL[®] имеют гораздо более низкие коэффициенты термического расширения, чем большинство других пластмасс, требуется сохранять минимальный зазор между валом и подшипником. Для подшипников скольжения из полиимида VESPEL[®] обычно требуется зазор величиной 0,3%-0,5% диаметра вала, в зависимости от конкретного применения. При более тяжелых нагрузках, как правило, требуется увеличивать зазоры. Уменьшение рабочего зазора конструктивно возможно после прорезания бороздок в подшипнике для периферического теплового расширения. Во многих практических применениях термическое расширение пренебрежимо мало, но оно может стать существенным при высоких температурах внешней среды.

Приведенная ниже формула может использоваться для приблизительного вычисления внутреннего диаметра полиимидных подшипников VESPEL[®]. Для более точного расчета обратитесь к Вашему местному представителю DuPont™ VESPEL[®]. В таблице 8 приведены коэффициенты термического расширения полиимидных композиций VESPEL[®].

Расчетный внутренний диаметр подшипника = диаметр вала при комнатной температуре + изменение диаметра вала при температурном расширении + рабочий зазор вала + изменение толщины стенки подшипника при температурном расширении.

$$ID = D (1 + \alpha S \Delta T_1 + C) + 2t \alpha SP \Delta T_2$$

где:

ID = внутренний диаметр подшипника

D = диаметр вала при температуры внешней среды

C = рабочий зазор вала, в % от диаметра вала

αS = коэффициент термического расширения материала вала

αSP = коэффициент термического расширения подшипника из материала VESPEL[®]

t = толщина стенки подшипника из материала VESPEL[®]

ΔT_1 = повышение температуры вала

ΔT_2 = повышение температуры подшипника

При расчете рабочих зазоров для полиимидных подшипников VESPEL[®] обычно не нужно учитывать воздействие влаги, поскольку полиимиды поглощают очень мало влаги. На рисунках 23-25 показаны кривые влагопоглощения.

Конечно, пределы PV и предельные рабочие температуры любого материала меняются в зависимости от конкретного применения, поскольку зависят от множества факторов. Поэтому для того, чтобы определить, как будут вести себя детали из материала VESPEL[®] в Вашем конкретном случае, требуются тщательные испытания.

Толщина стенок подшипников скольжения

Стенки подшипников скольжения из полиимида VESPEL[®] должны быть как можно более тонкими, поскольку тонкие стенки:

- лучше рассеивают тепло, выделяющееся при трении;
- снижают колебания рабочего зазора, возникающие при тепловом расширении и изменении размеров при поглощении влаги;
- уменьшают деформацию подшипника под высокими нагрузками.

Для большинства применений толщина стенок подшипников скольжения из полиимида VESPEL® составляет 1-2,5 мм.

Установка подшипников скольжения

Подшипники скольжения из полиимида VESPEL® могут крепиться либо механически, либо при помощи адгезива.

Для запрессовки полиимидных подшипников VESPEL® в металл мы советуем использовать подшипник с превышением по размерам. После запрессовки внутренний диаметр подшипника уменьшится до 90-110% (в зависимости от толщины стенок, диаметра и натяга) расчетного превышения по размерам, что приведет к небольшой сжимающей нагрузке на стенку подшипника. Типичное превышение по размерам составляет 0,5%, но сжимающая нагрузка должна быть отрегулирована в зависимости от требований конкретного применения. Для более точных расчетов обратитесь к местному представителю DuPont™ VESPEL®.

Детали из полиимида VESPEL® можно склеивать большинством промышленных связующих. В разделе о соединении деталей из полиимида VESPEL® обсуждается выбор связующего, подготовка поверхностей и другие соображения. При использовании любого связующего для достижения наилучших результатов необходимо придерживаться рекомендаций производителя.

Пример задачи на конструирование

Исследуется возможность применения полиимидных подшипников VESPEL® в смесительно-сушильной машине. Условия задачи:

- Два подшипника на 38-мм валу должны поддерживать нагрузку 17800 Н, при температурах от 21°C до 274°C.
- Максимальная длина подшипника равна 38 мм, максимальный рабочий зазор в горячем и холодном состоянии составляет 0,40 мм.
- Для предотвращения загрязнения продукции нельзя использовать подшипники со смазкой. Подшипники должны проработать без техобслуживания 3 года по 40 часов в неделю.
- Вал смесительно-сушильной машины вращается с остановками, 5% времени – вращение со скоростью 20 об/мин, 95% времени – остановка.

Требуется определить с помощью таблицы “Рекомендуемые пределы PV”, возможно ли использовать полиимидные подшипники VESPEL® в этих условиях.

Решение

1. Проверка температурного предела

Предельная температура поверхности полиимида SP21 на воздухе равна 393°C, так что если соотношение PV не очень велико, то поверхностная температура не должна подниматься более чем на 119°C – на разницу между 274°C и 393°C.

2. Проверка соотношения PV

Вычислите давление на подшипник:

$$p = \frac{F}{LD} = \frac{8900\text{N (на подшипник)}}{38\text{мм} \times 38\text{мм}} = 6,163\text{МПа}$$

Вычислите скорость вала:

$$V = \pi \times DN = \frac{\pi \times 0,038\text{м} \times 20\text{об/мин}}{60} = 0,04\text{м/с}$$

Вычислите соотношение PV:

$$PV = 6,613\text{ МПа} \times 0,04\text{ м/с} = 0,245\text{ МПа} \cdot \text{м/с}$$

При таких низких соотношениях PV полиимид будет работать в режиме умеренного износа, так что PV не является лимитирующим фактором, особенно с учетом вращения с остановками.

3. Проверьте износостойкость

Вычислите время работы:

$$T = 0,05 \times \frac{40\text{ч}}{\text{неделя}} \times \frac{52\text{неделя}}{\text{год}} \times 3\text{года} = 312\text{ч}$$

$$\begin{aligned} \text{Радиальный износ} &= \text{коэффициент износа} \times PV \times \text{время работы} \\ &= 0,67 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм} \times 0,245 \text{ МПа} \cdot \text{м/с} \times 1123200 \text{ с} \\ &= 0,183 \text{ мм} \end{aligned}$$

*в данном случае принят равным $0,67 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$

Такой износ составляет меньше максимально допустимого зазора между подшипником и валом. Если разность достаточна с учетом термического расширения, то детали из полиимида VESPEL® удовлетворяют этим требованиям.

4. Расчет – Определите зазор при комнатной температуре

На этом этапе опыт и субъективное мнение играют большую роль, поскольку точного решения не существует. Как показывает опыт, все рабочие части подшипника: вал, поверхность, внешний диаметр и корпус – нагреваются до разных рабочих температур.

Предположим, что:

- контактная поверхность нагревается на 56°C выше температуры сушильной машины, но:
- средняя температура корпуса подшипника всего на 28°C выше температуры сушильной машины, причем:
- корпус подшипника остается при комнатной температуре и крепко удерживает подшипник, следовательно:
- при нагревании подшипник может расширяться только внутрь, а:
- вал – наружу.

При сделанных предположениях первоначальный зазор при комнатной температуре (C_d) определяется из следующего уравнения:

$$C_d = D (\alpha S \Delta T_1 + C) + 2 t \alpha SP \Delta T_2$$

где:

D = диаметр вала

αS = коэффициент термического расширения вала = $11 \times 10^{-6} \text{ м/м/}^\circ\text{C}$

C = рабочий зазор, здесь 0,1%

t = толщина стенки подшипника

αSP = коэффициент термического расширения подшипника из смолы SP21 = $41 \times 10^{-6} \text{ м/м/}^\circ\text{C}$

ΔT_1 = повышение температуры вала

ΔT_2 = повышение температуры подшипника.

Если взять толщину стенки подшипника 1,59 мм, то

$$C_d = 38 [11 \times 10^{-6} \cdot (330-21) + 0,001] + (2 \times 1,59 \times 41 \times 10^{-6}) \times (302 - 21) = 0,167 \text{ мм} + 0,037 \text{ мм} = 0,204 \text{ мм}$$

5. Проверьте максимальный зазор

Первоначальный зазор плюс износ через 3 года будет равен

$$0,204 + 0,183 = 0,387 \text{ мм}$$

это меньше указанного в условиях задачи предела.

Таким образом, полиимидный подшипник VESPEL® удовлетворяет требованию работы без смазки в данных высокотемпературных условиях.

Если возникают проблемы с расширением подшипника, то в нем нужно прорезать шлицы.

Подшипники со смазкой

Детали из полиимида VESPEL® также хорошо работают со смазкой. При полной гидродинамической смазке (толстой пленкой) нормальный механический износ отсутствует, и подшипники из полиимида VESPEL® будут работать так же хорошо, как обыкновенные подшипники. При смазке граничным (тонким) слоем износ и трение подшипников из полиимида SP будет зависеть от типа смазки. Сочетание частичного разделения и химического изменения поверхностей влияет на функциональные характеристики подшипника. Динамическая вязкость смазки (Z), число оборотов (N) и давление на контактную поверхность (P) влияют на толщину смазывающей пленки. В свою очередь, толщина пленки определяет эффективность работы полиимидного подшипника VESPEL®.

Коэффициент износа плоского упорного подшипника из полиимида SP1 в условиях смазки тонкой пленкой резко падает с увеличением отношения ZN/P (этот безразмерный параметр определяет толщину пленки). Сравните коэффициенты износа подшипников из полиимида SP со смазкой, бронзы и баббита на рис. 43. Коэффициент износа подшипника из полиимида SP остается в пределах $0,2-0,4 \times 10^{-7}$ при всех смазывающих пленках кроме самой тонкой, что гораздо лучше, чем износ бронзы, и примерно столько же, как у баббита (для большинства смазывающих пленок).

Однако материал SP превосходит оба указанных выше традиционных материала в сочетании с использованием тонких пленок ($ZN/P < 3$). К сожалению, мы не достаточно понимаем, как взаимодействует твердое вещество с жидкостью, чтобы надежно предсказать износ подшипников, смазываемых тонкими пленками различной толщины.

Зависимости коэффициента трения от соотношения ZN/P для всех трех материалов показаны на рис. 44-46. Снова видно, что материал SP превосходит два других материала. Для снижения сил трения требуются более тонкие пленки. Эти результаты (как и коэффициенты износа) были получены для трехсегментного плоского упорного подшипника, с контактным давлением до 13,8 МПа и скоростями скольжения от 0,015 до 15 м/с, который смазывался нефтяным маслом без присадок. Переход от смазки тонкой пленкой к смазке толстой пленкой происходит при примерно одинаковой толщине пленки для всех трех материалов, и коэффициенты гидродинамического трения одинаковы.

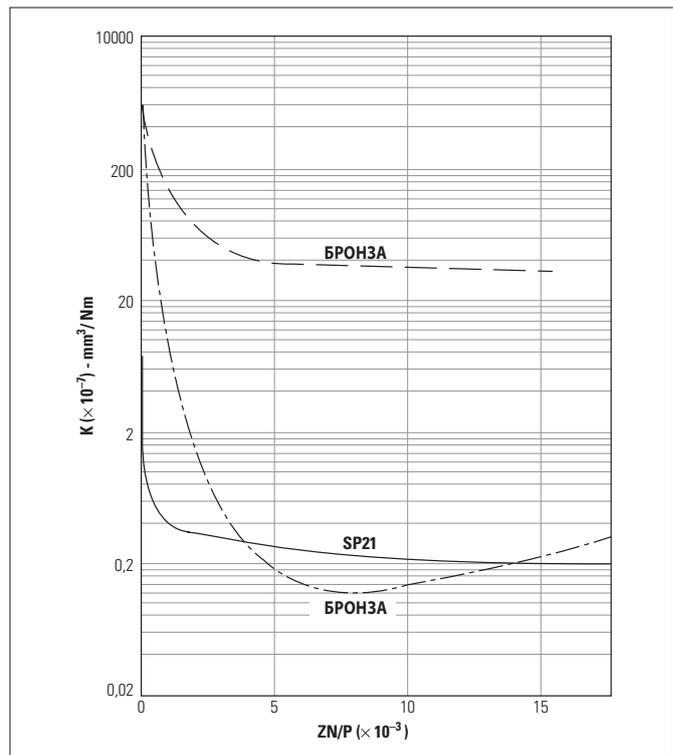


Рис. 43 Результаты испытания подшипников со смазкой на износ. Зависимость коэффициента износа от соотношения ZN/P, прилегающая поверхность - сталь AISI 1080 (твердость $HR_c = 55$, шероховатость $Ra = 0,4$). Сегментированный плоский упорный подшипник. Смазка: масло «Sunvis» 31

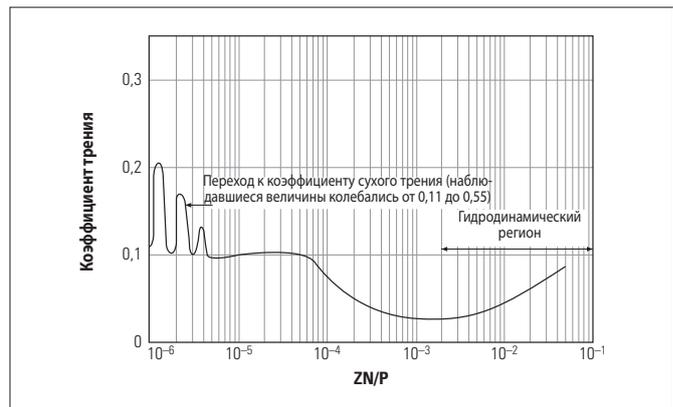


Рис. 44 Результаты испытания подшипников со смазкой на трение. Трение сегментированного плоского упорного подшипника из полиимида SP1 о сталь AISI 1080 (твердость $HR_c = 55$, шероховатость $Ra = 0,4$). Смазка: масло «Sunvis» 31

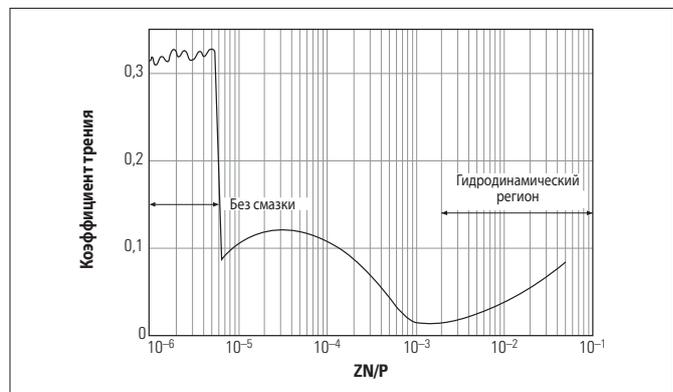


Рис. 45 Результаты испытания подшипников со смазкой на трение. Трение сегментированного плоского упорного подшипника из бронзы о сталь AISI 1080 (твердость $HR_c = 55$, шероховатость $Ra = 0,4$). Смазка: масло «Sunvis» 31

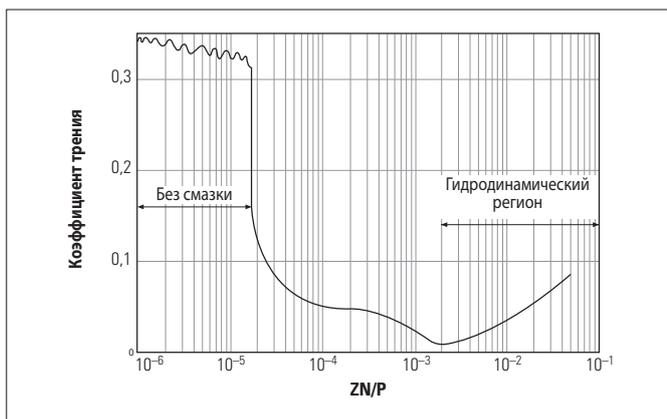


Рис. 46 Результаты испытания подшипников со смазкой на трение. Трение сегментированного плоского упорного подшипника из баббита о сталь AISI 1080 (твёрдость $HR_c = 55$, шероховатость $Ra = 0,4$). Смазка: масло «Sunvis» 31

Прекращение подачи смазки

Важный фактор, который необходимо принимать во внимание – это работа смазывающихся частей в случае отсутствия подачи смазки. Если подшипники из бронзы и баббита не могут работать без смазки, подшипники из полиимида VESPEL® будут продолжать работать без заедания и истирания, пока не превзойден температурный предел. Таким образом, в случае прекращения подачи смазки характеристики износа и трения просто переключатся из режима работы в граничном слое смазки в сухой режим. Превосходство полиимида в этой ситуации ясно видно на рис. 47. После прекращения подачи смазки силы трения во всех трех системах быстро возрастают. Однако когда оба подшипника из традиционных материалов отказали, подшипник из полиимида VESPEL® продолжает работать.

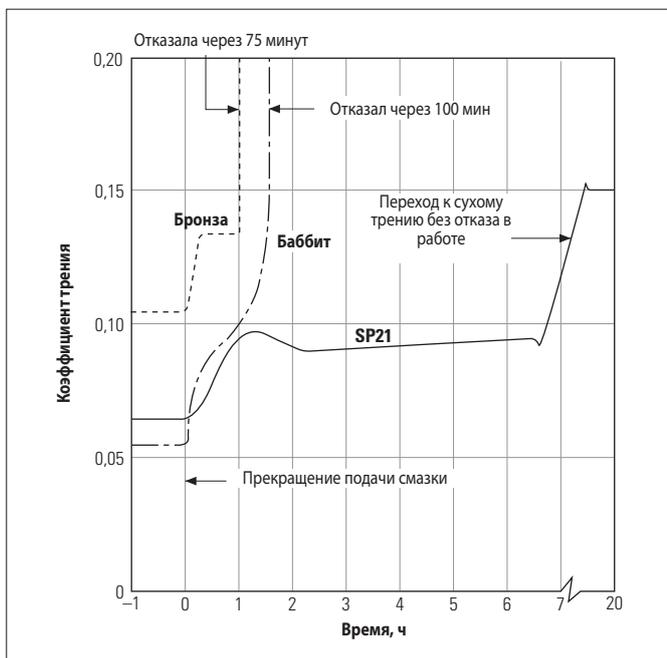


Рис. 47 Испытание смазывающихся подшипников на работу без смазки. Сегментированный плоский упорный подшипник. Прилегающая поверхность: AISI 1080 (твёрдость $HR_c = 55$, шероховатость $Ra = 0,4$). $P = 3,5$ МПа, $V = 0,1$ м/с. Смазка: масло «Sunvis» 31 – $ZN/P \approx 1,4 \times 10^{-4}$ при $T = 0$

Упорные подшипники из полиимида VESPEL® SP21 хорошо работали в трансмиссионном масле типа «А» и силиконовом масле F-50. Однако тонкие пленки некоторых жидкостей, например воды, не могут хорошо смазывать подобные подшипники. Для эффективной смазки жидкость должна смачивать скользящие поверхности. Например, водяная пленка, достаточно толстая для того чтобы полностью разделить трущиеся поверхности, на самом деле увеличивает скорость износа полиимидных подшипников. В этом нет ничего особенного: подобное явление наблюдалось и при испытаниях других пластмасс. Общее решение в этом случае – добавить поверхностно-активное вещество для снижения силы поверхностного натяжения жидкости.

Эффект прерывистого скольжения

Этот эффект наблюдается при запуске механизма, когда происходит переход от сцепления к скольжению. Он наблюдается обычно при очень малых скоростях и увеличении проскальзывания. Часто этот эффект наблюдается после доводки трущейся металлической поверхности.

Прерывистого скольжения часто можно избежать, если снизить нагрузку на поверхность, использовать более шероховатые металлические поверхности или закалять металл. Также помогает смазка.

Кольцевые уплотнители

Почему полиимиды?

Полиимидные смолы хорошо подходят для кольцевых уплотнителей, применяемых в условиях высоких температур, где требуется гибкость материала и превосходные характеристики уплотнения. Полиимиды одинаково хорошо работают в широком диапазоне температур: от криогенных до 300°C - и могут в течение короткого времени переносить температуры до 500°C. При этом полиимиды могут выдерживать большие нагрузки, чем другие пластмассы. В то же время они более пластичны, чем металлы, поскольку свойство упругости позволяет им избежать остаточных деформаций.

Полиимиды имеют все преимущества структурных особенностей чугуна – обычного материала для изготовления кольцевых уплотнителей – и все преимущества конструктивных пластиков, включая износостойкость и низкое трение. Полиимиды более устойчивы, чем большинство других пластиков. Важное отличие уплотнителей из полиимидов от других уплотнителей – возможность работы без смазки, например в качестве газонепроницаемых уплотнений. Из-за присущей полиимидам скользкости они хорошо сопротивляются износу при работе без смазки, при соотношениях давление-скорость до 12 МПа · м/с в сухих условиях.

Полиимиды выдерживают воздействие большинства промышленных жидкостей, растворителей, углеводородов и синтетических смазок (гидравлического масла, трансмиссионных масел), инертных газов (азота, аргона), некоторых топлив. Это позволяет использовать полиимиды для изготовления кольцевых уплотнителей для трансмиссий, пневматических и гидравлических цилиндров, внедорожников, военных машин и в различных пневмо- и гидрораспределительных механизмах.

Использование деталей из полиимида VESPEL® позволит Вам снизить стоимость гарантийного обслуживания, уменьшить время простоя механизмов, снизить производственные издержки.

Этот раздел Руководства поможет Вам использовать кольцевые уплотнители из полиимида VESPEL® наиболее экономически эффективным способом. В этом разделе Вы найдете информацию о:

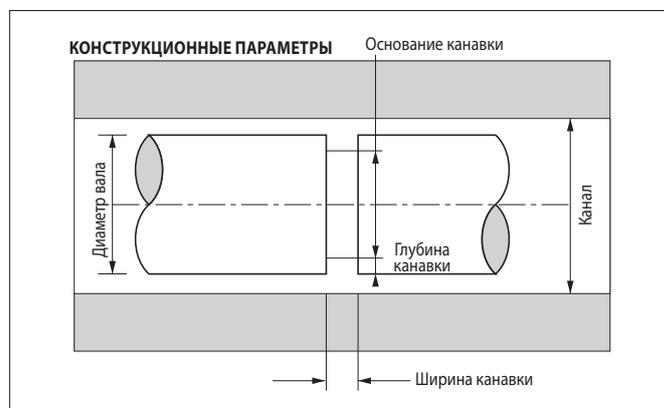
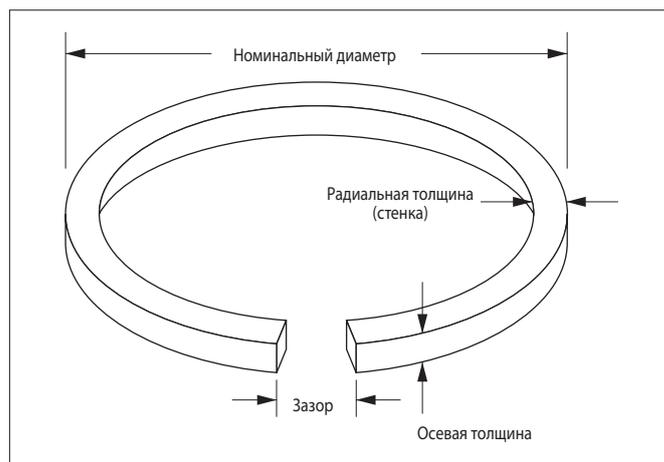
- параметрах, важных для проектирования кольцевых уплотнителей;
- методах расчета кольцевых уплотнителей;
- способах повышения эффективности работы кольцевых уплотнителей из полиимида VESPEL®;
- рекомендуемых допусках для кольцевых уплотнителей из полиимида VESPEL®.

Глоссарий расчетных параметров

Все применения кольцевых уплотнителей характеризуются общими геометрическими параметрами, как показано на двух иллюстрациях ниже.

- **Диаметр канала** – внутренний диаметр цилиндрического пространства, которое ограничивает движение кольцевого уплотнителя.
- **Номинальный диаметр** – внешний диаметр кольцевого уплотнителя. Обычно равен диаметру канала.
- **Стандартный диаметр** – диаметр измерительного прибора, обычно на ~0,2 мм больше номинального диаметра.

- **Радиальная толщина** – разница между внешним и внутренним диаметром кольцевого уплотнителя, иногда называется «толщиной стенки»
- **Осевая толщина** – толщина кольцевого уплотнителя от верха до низа (высота кольца)
- **Зазор** – расстояние между открытыми концами кольцевого уплотнителя при упоре в стандартном диаметре
- **Номинальный зазор** – расстояние между открытыми концами кольцевого уплотнителя при упоре в номинальном диаметре
- **Основание канавки** – диаметр канавки, который будет обращен к внутренней поверхности кольцевого уплотнителя
- **Ширина канавки** – осевой размер канавки кольцевого уплотнителя



Стандартное проектирование соединенных встык кольцевых уплотнителей, изготовленных прямым формованием

Если в Вашем механизме используются металлические кольцевые уплотнители или уплотнители из других конструктивных пластиков, то перед расчетом новых кольцевых уплотнителей из полиимида VESPEL® нужно учесть несколько факторов. Данный раздел обсуждает зависимости между размерами существующей механической системы и размером нового кольцевого уплотнителя. Все размеры даны в миллиметрах.

1. Номинальный диаметр

Внешний диаметр расширенного кольцевого уплотнителя должен быть равен диаметру канала механической системы.

2. (осевая толщина)_{макс} = (ширина канавки)_{мин} - 0,1 мм

Суммарный боковой зазор 0,1 мм должен позволять кольцевому уплотнителю в кольцевой канавке расширяться при максимальной температуре

3. (радиальная толщина)_{макс} = 0,5 [(диаметр канала)_{мин} - (диаметр основания канавки)_{макс}] - 0,1 мм

Суммарный радиальный зазор 0,1 мм должен позволять основанию канавки расширяться в канале при максимальной температуре

4. (Зазор)_{мин} = π × (стандартный диаметр) (T_{макс} - 20) (αSP - αB)

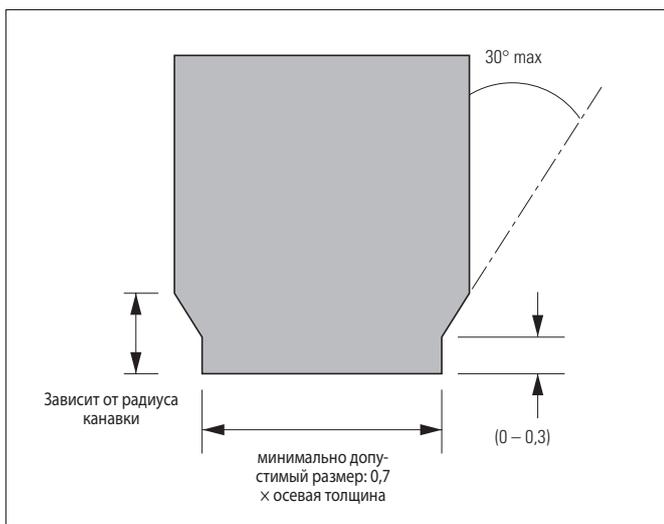
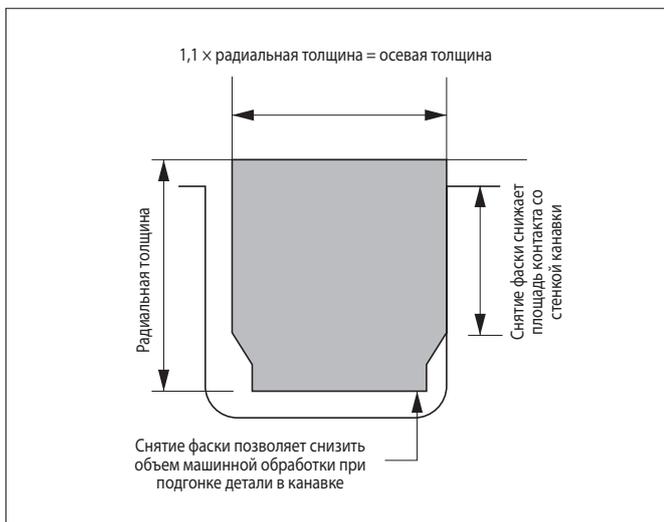
где:

T = температура, °C

αB = коэффициент термического расширения материала канала, 10⁻⁶ 1/°C

αSP = коэффициент термического расширения детали из материала VESPEL®, 10⁻⁶ 1/°C (см. Таблицу 8).

Это уравнение для вычисления минимального зазора, требуемого при учете термического расширения кольцевого уплотнителя при рабочей температуре. При расчетной температуре кольцо просто сомкнется.



5. (осевая толщина) ≥ 1,1 (радиальная толщина)

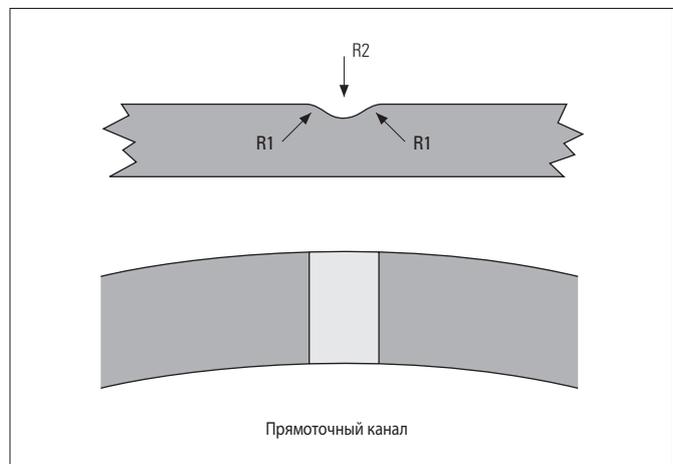
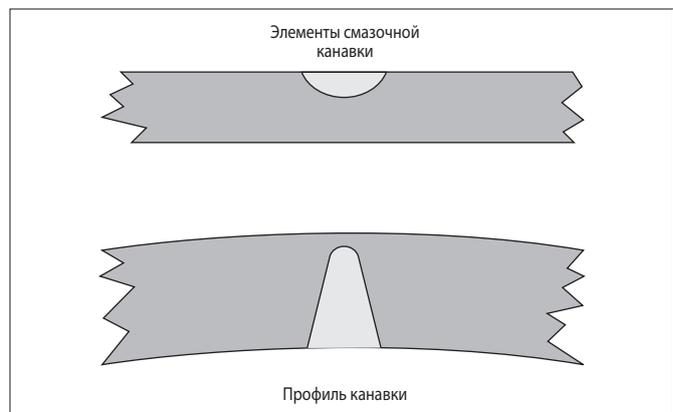
С кольцевых уплотнителей из полиимида VESPEL® можно снимать фаску по внутреннему диаметру для снижения площади соприкосновения между кольцевым уплотнителем и поверхностью канавки, если геометрия устройства позволяет держать осевую толщину в пределах 110% от радиальной толщины. Радиальная толщина уменьшается при увеличении глубины снятия фаски, создавая лучший баланс давления для удержания уплотнителя в канале. Еще одним преимуществом фаски является возможность обеспечить зазор с любыми радиусами **ОСНОВАНИЯ** канавки, получающимися при проточке канавки.

Фаска должна сужаться под углом не более 30° и иметь кромку 0-0,3 мм под фаской.

Высота кромки (измеренная в самой узкой части кольца) не должна превышать 70% осевой толщины.

Другие соображения, учитываемые при проектировании

- **Качество обработки поверхности канавки.** Шероховатость металла является важным фактором при конструировании механических систем с уплотнениями, поскольку важно обеспечить достаточное трение между соприкасающимися поверхностями. Детали из полиимида VESPEL® очень хорошо зарекомендовали себя, особенно при смазке. Рекомендуется доводить металл до гладкой поверхности 0,4 μm Ra. Материал канавки должен быть как можно более твердыми. Если используется чугун, то качество обработки поверхности не столь важно. Как показали гидравлические испытания, прилегающие поверхности из чугуна отшлифованные до 2,0 μm Ra ведут себя при износе так же хорошо, как поверхности, доведенные до 0,8 μm Ra.



- **Измерение зазора в кольце.** Большинство пластиков до некоторой степени впитывают влагу из воздуха. Поскольку влагосодержание влияет на размеры кольца, зазоры измеряют только после полного высыхания кольца – его выдерживают при 150°C в течение 3 часов. После указанной выдержки кольцо принимает такие же размеры, как при работе в реальных условиях, и вся влага из кольца испаряется. Точно измерять кольцевые уплотнители из полиимида VESPEL® можно только измерительным калибром, при контакте с наружной поверхностью калибра. Для более точных измерений требуются оптические методы.
- **Смазочные канавки.** Канавки делают для подачи смазки к поверхности кольца для улучшения его износостойкости. Кольцевые уплотнители из полиимида VESPEL® поставляются со смазочными канавками различных профилей на выбор заказчика. Показанные здесь два профиля испытывались в различных механических системах и показали свою работоспособность во многих случаях.

Расчетные допуски

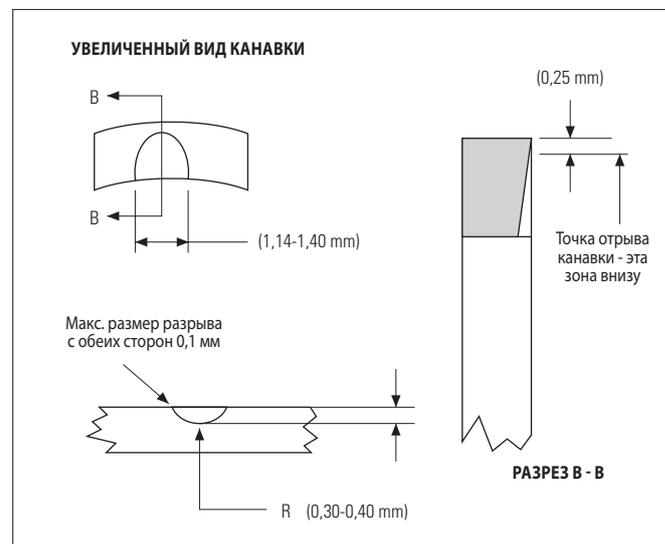
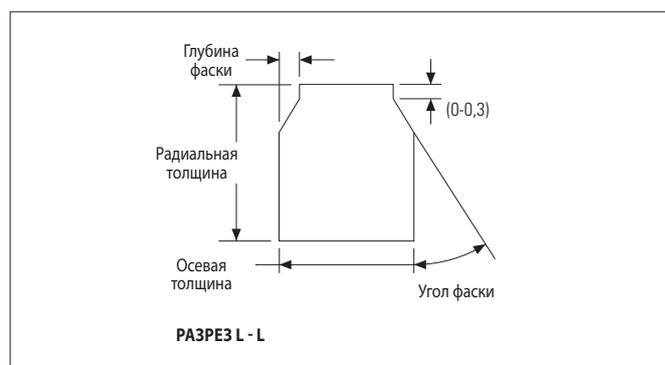
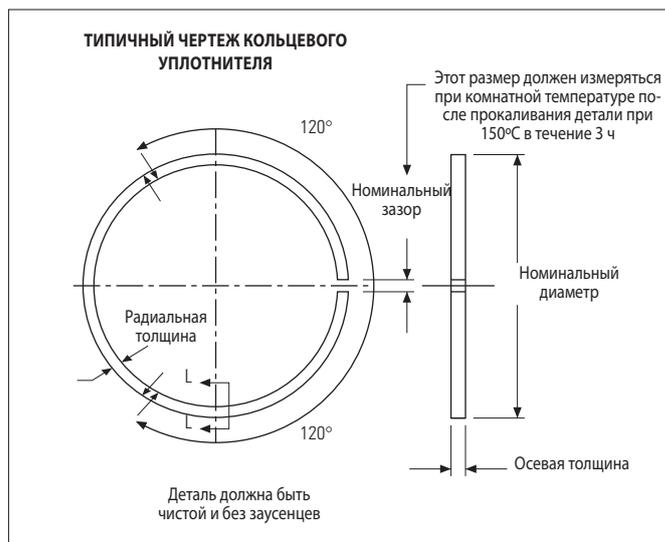
Расчет кольцевых уплотнителей из полиимида требует нового подхода к допускам по размерам. Превосходные характеристики этого материала и поверхности с низким коэффициентом трения позволяют конструкторам создавать уплотнительные кольца, которые не требуют таких строгих допусков, как при работе с металлами. Как показывает практика, кольцевые уплотнители из полиимида дают лучшее уплотнение, чем металл по металлу, даже если металлические уплотнители доводить машинной обработкой до гораздо более жестких допусков.

Это свойство полиимидов помогает конструкторам экономить на дорогостоящей доводке деталей до высокого качества поверхностей. Таблица ниже содержит рекомендуемые допуски для стандартных полиимидных уплотнительных колец. Поскольку полиимиды более устойчивы, чем другие конструкционные пластики, и в то же время более гибкие, чем металлы, они лучше выдерживают нагрузки во время сборки и часто их легче устанавливать.

Кольцевые уплотнители из чугуна очень жесткие, но хрупкие, поэтому во время монтажа они часто ломаются. В то же время уплотнители из других конструкционных пластиков мягче, чем полиимиды, поэтому при монтаже они часто незаметно срезаются или скалываются.

Рекомендуемые допуски (размеры даны в мм)

Стандартный диаметр	Зазор	Осевая стенка	Радиальная стенка
<38	±0,10	±0,10	±0,025
от 38 до 64	±0,125	±0,125	±0,025
от 64 до 89	±0,15	±0,15	±0,040
от 89 до 127	±0,175	±0,175	±0,040
от 127 до 178	±0,23	±0,23	±0,050



Марки полиимидов VESPEL® для изготовления кольцевых уплотнителей

SP21 – стандартный материал для кольцевых уплотнителей. Этот материал предпочтителен потому, что наилучшим образом сочетает механическую прочность и износостойкость.

SP22 – имеет приблизительно такую же износостойкость, но более хрупкий. Однако его коэффициент линейного теплового расширения ниже, чем у SP21.

SP211 – похож на SP21, но имеет более низкий коэффициент трения при температурах до 150°C.

Из-за влияния процесса производства на коэффициент термического расширения (см. Таблицу 8) перед конечным использованием детали заказчик должен провести испытания деталей, произведенных машинной обработкой или прямым формованием.

Прилегающая поверхность из алюминия

В отличие от большинства других материалов для кольцевых уплотнителей, VESPEL® может скользить как по боковой стенке канавки, так и по стенкам канала. Когда одним из прилегающих материалов является алюминий, а другим – сталь/чугун, то очень полезно использовать полиимидный кольцевой уплотнитель, который позволял бы относительное движение уплотнителя по стали/чугуну.

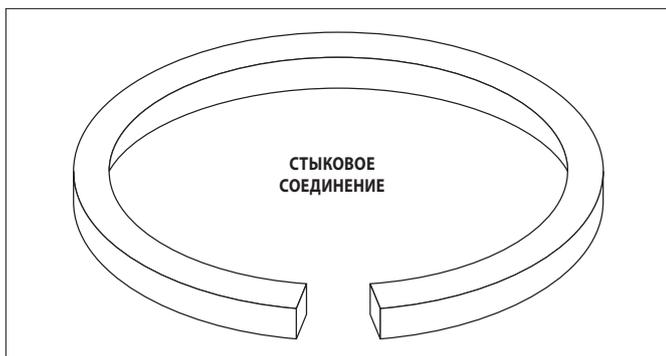
Проектирование кольцевых уплотнителей в некоторых особых случаях

Появление все большего числа требований к кольцевым уплотнителям, особенно в автомобильных трансмиссиях, привело к созданию целого ряда руководств по созданию кольцевых уплотнителей в зависимости от конкретной практики применения.

Геометрия зазора

Стыковое соединение

- Возможность изготовления прямым формованием
- Зазор закроется при повышении температуры и может подвергаться сжатию без остаточной деформации
- Эффективное по затратам решение



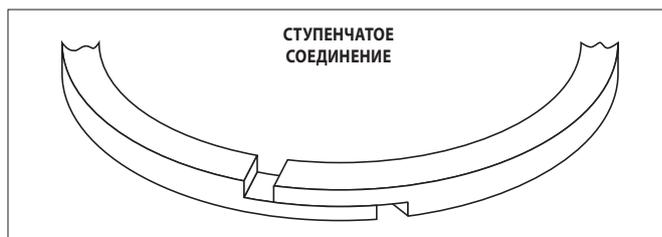
Соединение в косой накладной замок

- Нельзя изготовить прямым формованием
- Нужно вытачивать
- Эффект закрытия зазора при повышении температуры гораздо меньше, чем для стыкового соединения



Ступенчатое соединение

- Возможность изготовления прямым формованием определяется геометрией изделия
- Ведет себя подобно стыковому соединению, но просвет зазора слегка меньше



Сжатые стыковые соединения очень редко ломаются

Прочность полиимида VESPEL® позволяет ему испытывать некоторое сжатие без остаточной деформации. Поэтому стыковые соединения кольцевых уплотнителей из полиимида VESPEL®, могут разрабатываться с таким расчетом, чтобы зазор закрывался уже при 20°C и оставался закрытым при повышении температуры до максимальной рабочей. Термическое расширение кольцевого уплотнителя из полиимида VESPEL® будет приводить к внутренней упругой деформации материала. Для предотвращения искривления кольца в канавке при тепловом сжатии необходимо минимальное давление масла, которое будет прижимать кольцо к уплотняемой поверхности. Чем меньше диаметр кольца, тем большее давление масла потребуется. Поэтому очень важно знать минимальное давление масла, необходимое для предотвращения выгибания кольца в данной гидравлической системе.

Осевая толщина кольцевых уплотнителей с очень низкими значениями протечек масла должна быть настолько велика, насколько позволяют размеры канавки и конструкционные требования. Рекомендуется сохранить возможность относительного движения кольцевого уплотнителя по канавке вала, так что кольцевой уплотнитель будет почти неподвижен относительно корпуса.

Кольцевые уплотнители для соединений в косой накладной замок (внапуск)

Кольцевые уплотнители для соединений в косой накладной замок обычно изготавливаются с разрезом в 20°, такие уплотнители хорошо известны и широко используются. Они не могут быть изготовлены в одну стадию. После штамповки целого кольца в нем протачивается разрез.

Скорость протечки жидкости сквозь такое соединение несколько выше, чем через сжатое стыковое соединение. Однако кольцевые уплотнители с соединением в косой накладной замок не столь чувствительны к минимальному давлению в гидравлической трансмиссии.

Сборка

Кольцевые уплотнители из полиимида VESPEL® можно изготавливать таким образом, чтобы материал сохранял «память», то есть способность прижиматься к ножке канавки. Такие кольца поставляются в закрытом виде или перекрывающими зазор внахлест. После установки таких колец на вал они стремятся прижаться к внутренней поверхности основания канавки. Этот эффект позволяет легко и без поломок собрать механизм в корпусе, не используя смазку.

Тем не менее, рекомендуется хранить кольцевые уплотнители в упаковке до окончательной сборки и использовать конические инструменты для плавного введения колец в канавки. За дополнительной информацией обратитесь к местному представителю по продажам деталей VESPEL®.

Кольцевые уплотнители из полиимида VESPEL® имеют более высокие модули изгиба по сравнению, например, с уплотнителями из политетрафторэтилена, поэтому их можно использовать при автоматизированной конвейерной сборке.

Толщина стенки сжатого кольца не должна превышать:

$$0,5 \times (\text{ДИАМЕТР ВАЛА}_{\text{мин}} - \text{ДИАМЕТР ОСНОВАНИЯ КАНАВКИ}_{\text{макс}}) - 0,05 \text{ мм}$$

Для того чтобы избежать поломки кольцевого уплотнителя во время установки собранной на вале конструкции в корпус, допуск толщины стенок должен быть как можно меньше.

Выбор материала

При выборе марки полиимида нужно учитывать разницу в тепловом расширении и скоростях износа различных марок. На основании эксплуатационных условий, требований к протечке и минимального давления в гидравлической трансмиссии определяется тип зазора кольцевого уплотнителя и допуск зазора. Рис. 48-51 иллюстрируют влияние типа зазора кольцевого уплотнителя и марки полиимида на скорость протечки.

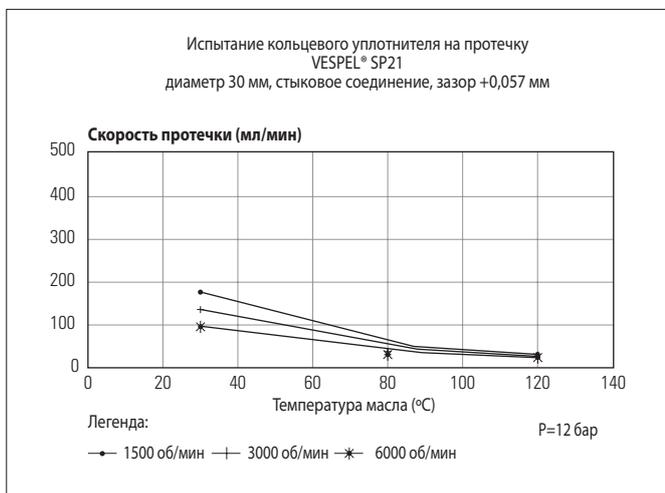


Рис. 48 Кольцевой уплотнитель из полиимида SP21. Стыковое соединение (положительное)

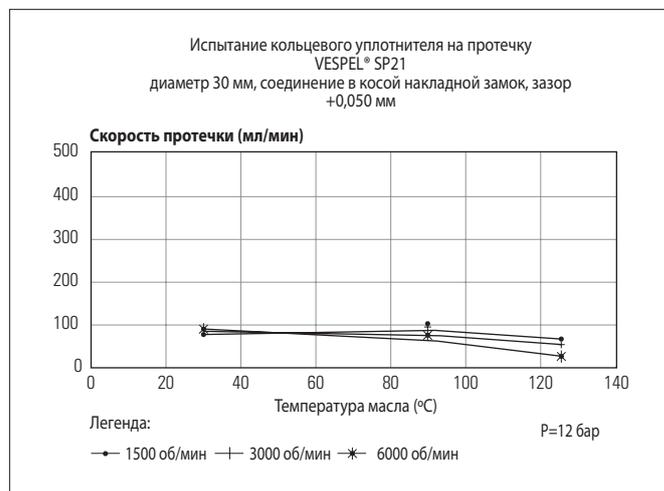


Рис. 50 Кольцевой уплотнитель из полиимида SP2150. Соединение в косой накладной замок

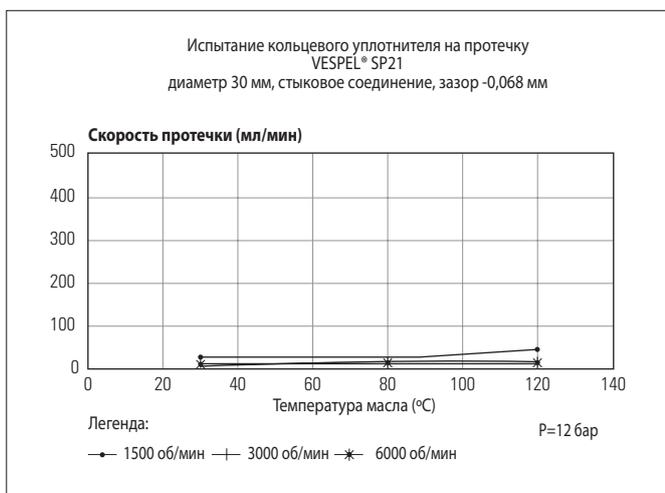


Рис. 49 Кольцевой уплотнитель из полиимида SP21. Сжатое стыковое соединение (отрицательное)

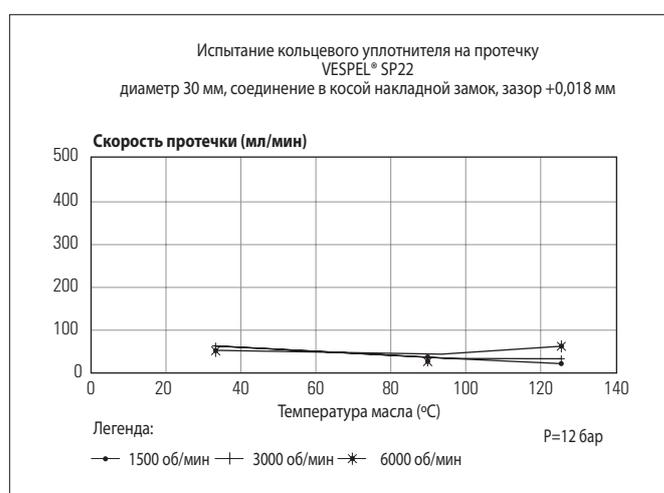


Рис. 51 Кольцевой уплотнитель из полиимида SP22. Соединение в косой накладной замок

ТАБЛИЦЫ И РИСУНКИ

Таблицы

1 - Перечень основных характеристик стандартных полиимидных смол серии SP.....	7
2 - Перечень основных характеристик стандартных полиимидных смол серии SP.....	8
3 - Предварительные характеристики новых полиимидных смол серии SP.....	9
4 - Типичные характеристики деталей, изготовленных прямым формованием из полиимида VESPEL® серии ST.....	10
5 - Воздействие химических веществ.....	21
6 - Рекомендуемые пределы PV.....	34
7 - Типичные коэффициенты трения – испытания упорных подшипников без смазки.....	36
8 - Коэффициент термического расширения.....	37

Рисунки

1 - Химическая формула полиимида VESPEL® SP.....	3
2 - Заготовки и профили из полиимида SP. Типичный ход зависимости предела прочности на разрыв от температуры, ASTM D1708.....	11
3 - Детали из полиимидов серий SP и ST, изготовленные прямым формованием. Типичный ход зависимости предела прочности на разрыв от температуры, ASTM E8.....	11
4 - Заготовки и профили из полиимида SP. Типичный ход зависимости модуля упругости от температуры, ASTM D740.....	11
5 - Детали из полиимидов серий SP и ST, изготовленные прямым формованием. Типичный ход зависимости модуля упругости (модуль изгиба) от температуры, ASTM D790.....	11
6 - Воздействие воздуха на полиимид серии SP при повышенных температурах. Приблизительный промежуток времени до 50%-ного снижения предела прочности на разрыв в зависимости от температуры.....	12
7 - Зависимость относительного удлинения при разрыве от температуры, материал SP21 в отличие от ST2010.....	12
8 - Зависимость предела прочности при сжатии от температуры, SP21 в сравнении с ST2010.....	13
9 - Зависимость предела прочности при растяжении от температуры, SP21 в сравнении с ST2010.....	13
10 - Заготовки из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при температуре 23°C, ASTM D1708.....	13
11 - Заготовки из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при температуре 260°C, ASTM D1708.....	13
12 - Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при температуре 23°C, ASTM E8 (⊥ направлению формования).....	13
13 - Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP. Типичные кривые напряжение-деформация при растяжении, при температуре 260°C, ASTM E8 (⊥ направлению формования).....	14
14 - Заготовки из полиимида SP при сжатии и при температуре 23°C, ASTM D695.....	14
15 - Заготовки из полиимида SP при сжатии и при температуре 300°C, ASTM D695.....	14
16 - Детали, изготовленные прямым формованием из полиимидов серии SP и ST. Типичные кривые напряжение – деформация при сжатии при температуре 23°C, ASTM D695 (направлению формования).....	14
17 - Заготовки из полиимида SP1. Зависимость суммарной деформации под нагрузкой от времени.....	15
18 - Заготовки из полиимида SP21. Зависимость суммарной деформации под нагрузкой от времени.....	15
19 - Заготовки из полиимида SP22. Зависимость суммарной деформации под нагрузкой от времени.....	15
20 - Заготовки из полиимида SP1. Зависимость кажущегося модуля упругости под нагрузкой от времени.....	15
21 - Заготовки из полиимида SP21. Зависимость кажущегося модуля упругости под нагрузкой от времени.....	15
22 - Заготовки из полиимида SP22. Зависимость кажущегося модуля упругости под нагрузкой от времени.....	15
23 - Заготовки из полиимидов SP1 и SP21. Типичное изменение размеров со временем при 50% отн. влажности и температуре 23°C, толщина бляшек 3,2 мм.....	15
24 - Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP1. Типичное изменение размеров со временем при 50% и 100% отн. влажности и температуре 23°C, диски диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм.....	16

25 - Детали, изготовленные прямым формованием из полиимида SP21. Типичное изменение размеров со временем при 50% и 100% отн. влажности и температуре 23°C, диски диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм.....	16
26 - Заготовки из полиимидов SP1 и SP21. Типичное изменение размеров при достижении равновесия со средой при заданной относительной влажности воздуха и температуре 23°C.....	17
27 - Детали, изготовленные прямым формованием из полиимидов серии SP. Типичное изменение размеров при достижении равновесия со средой при заданной относительной влажности воздуха и температуре 23°C.....	17
28 - Заготовки из полиимидов серии SP. Линейное термическое расширение по ASTM D696.....	17
29 - Детали, изготовленные прямым формованием из полиимидов серий SP и ST. Линейное термическое расширение (⊥ направлению формования) по ASTM D696.....	17
30 - Заготовки из полиимида серии SP. Типичная стойкость к усталости в зависимости от температуры, при циклическом чередовании растяжений и сжатий с частотой 1800 циклов в минуту (30 Гц).....	18
31 - Диэлектрическая постоянная при различной температуре (SP1) по ASTM D150.....	18
32 - Коэффициент затухания при различной температуре (SP1) по ASTM D150.....	18
33 - Заготовки из полиимида SP1. Зависимость объемного сопротивления от температуры, по ASTM D257.....	19
34 - Заготовки из полиимида SP1. Зависимость поверхностного сопротивления от температуры, по ASTM D257.....	19
35 - Заготовки из полиимида SP1. Зависимость диэлектрической прочности от температуры, по ASTM D149.....	19
36 - Заготовки из полиимида SP1. Зависимость диэлектрической прочности от толщины, по ASTM 149 в масле A-8.....	19
37 - Зависимость скорости износа от соотношения давление-скорость, трение упорного подшипника из полиимида SP21 без смазки об углеродистую сталь.....	35
38 - Предел давление-скорость при трении подшипника из полиимида SP21 без смазки об углеродистую сталь.....	35
39 - Коэффициенты трения полиимида SP21 и SP211 о среднеуглеродистую сталь без смазки.....	36
40 - Коэффициенты износа полиимида SP21 и SP211 при трении о среднеуглеродистую сталь без смазки.....	36
41 - Влияние твердости прилегающего материала на износ.....	37
42 - Влияние качества обработки поверхности прилегающего материала на износ.....	37
43 - Результаты испытания подшипников со смазкой на износ. Зависимость коэффициента износа от соотношения ZN/P, прилегающая поверхность - сталь AISI 1080 (твердость HRC = 55, шероховатость Ra = 0,4), сегментированный плоский упорный подшипник. Смазка: масло «Sunvis» 31.....	40
44 - Результаты испытания подшипников со смазкой на трение. Трение сегментированного плоского упорного подшипника из полиимида SP1 о сталь AISI 1080 (твердость HRC = 55, шероховатость Ra = 0,4). Смазка: масло «Sunvis» 31.....	40
45 - Результаты испытания подшипников со смазкой на трение. Трение сегментированного плоского упорного подшипника из бронзы о сталь AISI 1080 (твердость HRC = 55, шероховатость Ra = 0,4). Смазка: масло «Sunvis» 31.....	40
46 - Результаты испытания подшипников со смазкой на трение. Трение сегментированного плоского упорного подшипника из баббита о сталь AISI 1080 (твердость HRC = 55, шероховатость Ra = 0,4). Смазка: масло «Sunvis» 31.....	41
47 - Испытание смазывающихся подшипников на работу без смазки. Сегментированный плоский упорный подшипник. Прилегающая поверхность: AISI 1080 (твердость HRC = 55, шероховатость Ra = 0,4), P = 3,5 МПа, V = 0,1 м/с. Смазка: масло «Sunvis» 31 – ZN/P ≈ 1,4 × 10-4 при T = 0.....	41
48 - Стыковое соединение (положительное) с использованием кольцевого уплотнителя из полиимида SP21.....	47
49 - Сжатое стыковое соединение (отрицательное) с использованием кольцевого уплотнителя из полиимида SP21.....	47
50 - Соединение в косой накладной замок с использованием кольцевого уплотнителя из полиимида SP21.....	47
51 - Соединение в косой накладной замок с использованием кольцевого уплотнителя из полиимида SP22.....	47

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Размеры стандартных заготовок

Прутки

Минимальный диаметр mm	Длина mm
6,3	965
9,5	965
11,1	965
12,7	965
15,8	965
19,0	965
25,4	965
31,7	965
38,1	965
50,8	965
63,5	965
82,5	685

Бляшки

Минимальная толщина мм	Площадь
50,8	254×254 мм ²
38,1	254×127 мм ²
25,4	127×127 мм ²
12,7	
6,3	
4,8*	
3,2*	
1,6*	

* Тонкие бляшки изготавливаются только из SP1 и SP21 с площадью 254×254 мм².

Бруски

Минимальные поперечные размеры ширина × толщина мм	Максимальная длина
101×50,8 мм	965 мм / 317,5 мм

Кольца и диски

Предлагается большой выбор колец и дисков с диаметрами от 15,8 мм до 63,5 мм и толщиной от 3,1 мм до 6,3 мм.

Шарики только из материала SP1

Диаметр в мм
3,2
6,3
9,5
12,7
15,8

Допуски размеров шариков ±0,051 мм

Трубы

Мин. внешний диаметр мм	Макс. внутренний диаметр мм	Максимальная длина мм
180	142	838
170	142	838
162	142	838
170	119	838
149	119	838
142	119	838
165	109	838
154	109	838
144	109	838
137	109	838
121	109	838
137	86,3	838
124	86,3	838
109	86,3	838
94	86,3	838
129	66,0	838
119	66,0	838
101	66,0	838
86,3	66,0	838
124	48,2	838
111	48,2	838
94,0	48,2	838
78,7	48,2	838
43,1	35,5	685
40,6	27,9	685

Большинство указанных здесь внешних размеров являются минимальными размерами. Фактический внутренний диаметр труб несколько меньше, чем показано в таблице.

Приложение В. Допуски по ISO

Номинальные размеры в мм		ОСИ																							Наименьшее и наибольшее отклонение размеров в микронах, $\mu(0,001\text{ mm})$																						
Свыше	до	g5	h5	j5	k5	m5	n5	g6	h6	j6	k6	m6	n6	r6	f7	h7	j7	k7	m7	n7	h8	e8	f8	h8	d9	e9	f9	h9	d10	a11	b11	c11	d11	h11													
1	-	-2	0	+2	+4	+6	+8	-2	0	+4	+6	+8	+10	+16	-6	0	+6	+10	-	+14	-	-14	-6	0	-20	-14	-6	0	-20	-	-60	-20	0														
		-6	-4	-2	0	+2	+4	-8	-6	-2	0	+2	+4	+10	+16	+10	-16	-10	0	+4	+4	-28	-20	-14	-45	-39	-31	-25	-60	-	-120	-80	-60														
3	1	-2	0	+2	+4	+6	+8	-2	0	+4	+6	+8	+10	+16	-6	0	+6	+10	-	+14	-140	-6	0	-20	-14	-6	0	-20	-270	-140	-20	0															
		-6	-4	-2	0	+2	+4	-8	-6	-2	0	+2	+4	+10	+16	+10	-16	-10	0	+4	+4	-154	-28	-20	-45	-39	-31	-25	-300	-200	-120	-80	-60														
6	3	-4	0	+3	+6	+9	+13	-4	0	+6	+9	+12	+16	+23	-10	0	+8	+13	+16	+20	+20	-140	-10	0	-30	-20	-10	0	-30	-270	-140	-70	0														
		-9	-5	-2	+1	+4	+8	-12	-8	-2	0	+1	+4	+8	+15	-22	-12	-4	+1	+4	+8	+8	-158	-38	-28	-18	-60	-50	-40	-30	-78	-345	-215	-145	-75												
10	6	-5	0	+4	+7	+12	+16	-5	0	+7	+10	+15	+19	+28	-13	0	+10	+16	+21	+25	+25	-150	-25	-13	-40	-25	-13	0	-40	-280	-150	-80	0														
		-11	-6	-2	+1	+6	+10	-14	-9	-2	0	+1	+6	+10	+19	+19	-28	-15	+1	+6	+10	-172	-47	-35	-22	-76	-61	-49	-36	-98	-370	-240	-170	-90													
14	10	-6	0	+5	+9	+15	+20	-6	0	+8	+12	+18	+23	+34	-16	0	+12	+19	+25	+30	-150	-32	-16	0	-50	-32	-16	0	-50	-290	-150	-95	0														
		-14	-8	-3	+1	+7	+12	-17	-11	-3	+1	+7	+12	+23	+23	-34	-18	-6	+1	+7	+12	-177	-39	-43	-27	-93	-75	-59	-43	-120	-400	-260	-205	-160													
18	24	-7	0	+5	+11	+17	+24	-7	0	+9	+15	+21	+28	+41	-20	0	+13	+23	+29	+36	-160	-40	-20	0	-65	-40	-20	0	-65	-300	-160	-110	0														
		-16	-9	-4	+2	+8	+15	-20	-13	-4	+2	+8	+15	+28	+28	-41	-21	-8	+2	+8	+15	-193	-73	-53	-33	-117	-92	-72	-52	-149	-430	-290	-240	-130													
30	40	-9	0	+6	+13	+20	+28	-9	0	+11	+18	+25	+33	+50	-25	0	+15	+27	+34	+42	-170	-50	-25	0	-80	-50	-25	0	-80	-310	-170	-120	0														
		-20	-11	-5	+2	+9	+17	-25	-16	-5	+2	+9	+17	+34	+34	-50	-25	-10	+2	+9	+17	-209	-89	-64	-39	-142	-112	-87	-62	-180	-470	-330	-280	-80													
50	65	-10	0	+6	+15	+24	+33	-10	0	+12	+21	+30	+39	+60	-30	0	+18	+32	+41	+50	-190	-60	-30	0	-100	-60	-30	0	-100	-340	-190	-140	0														
		-23	-13	-7	+2	+11	+20	-29	-19	-7	+2	+11	+20	+43	+62	-60	-30	-12	+2	+11	+20	-236	-106	-76	-46	-174	-134	-104	-74	-220	-360	-200	-150	-90													
80	100	-12	0	+6	+18	+28	+38	-12	0	+13	+25	+35	+45	+73	-36	0	+20	+38	+48	+58	-220	-72	-36	0	-120	-72	-36	0	-120	-380	-220	-170	0														
		-27	-15	-9	+3	+13	+23	-34	-22	-9	+3	+13	+23	+76	+84	-71	-35	-15	+3	+13	+23	-274	-126	-90	-54	-207	-159	-123	-87	-260	-410	-240	-180	-340													
120	140	-14	0	+7	+21	+33	+45	-14	0	+14	+28	+40	+52	+88	-43	0	+22	+43	+55	+67	-260	-85	-43	0	-145	-85	-43	0	-145	-520	-280	-210	0														
		-32	-18	-11	+3	+15	+27	-39	-25	-11	+3	+15	+27	+95	+106	-83	-40	-18	+3	+15	+27	-323	-148	-106	-63	-245	-185	-143	-100	-305	-770	-530	-460	-395													
160	180	-14	0	+7	+21	+33	+45	-14	0	+14	+28	+40	+52	+88	-43	0	+22	+43	+55	+67	-260	-85	-43	0	-145	-85	-43	0	-145	-580	-310	-230	0														
		-32	-18	-11	+3	+15	+27	-39	-25	-11	+3	+15	+27	+95	+106	-83	-40	-18	+3	+15	+27	-373	-148	-106	-63	-245	-185	-143	-100	-305	-830	-560	-480	-400													
200	225	-15	0	+7	+24	+37	+51	-15	0	+16	+33	+46	+60	+109	-50	0	+25	+50	+63	+77	-380	-100	-50	0	-170	-100	-50	0	-170	-740	-380	-260	0														
		-35	-20	-13	+4	+17	+31	-44	-29	-13	+4	+17	+31	+80	+130	-96	-46	-21	+4	+17	+31	-452	-172	-122	-72	-285	-215	-165	-115	-355	-1030	-670	-550	-460													
250	280	-17	0	+7	+27	+43	+57	-17	0	+16	+36	+52	+66	+126	-56	0	+26	+56	+72	+86	-480	-110	-56	0	-190	-110	-56	0	-190	-920	-480	-300	0														
		-40	-23	-16	+4	+20	+34	-49	-32	-16	+4	+20	+34	+98	+130	-108	-52	-26	+4	+20	+34	-412	-191	-137	-81	-320	-240	-186	-130	-400	-1240	-800	-620	-190													
315	355	-18	0	+7	+29	+46	+62	-18	0	+18	+40	+57	+73	+144	-62	0	+29	+61	+78	+94	-600	-125	-62	0	-210	-125	-62	0	-210	-1200	-600	-360	0														
		-43	-25	-18	+4	+21	+37	-54	-36	-18	+4	+21	+37	+150	+114	-119	-57	-28	+4	+21	+37	-689	-214	-151	-89	-350	-265	-202	-140	-440	-1350	-680	-400	-320													
400	450	-20	0	+7	+32	+50	+67	-20	0	+20	+45	+63	+80	+166	-68	0	+31	+68	+86	+103	-760	-135	-68	0	-230	-135	-68	0	-230	-1500	-760	-440	0														
		-47	-27	-20	+5	+23	+40	-60	-40	-20	+5	+23	+40	+172	+132	-131	-63	-32	+5	+23	+40	-840	-232	-165	-97	-385	-290	-223	-155	-480	-1650	-840	-480	-400													

Все вышеуказанная информация подлежит отказу от прав, напечатанному на задней обложке этой брошюры (копир под всеми таблицами)

Приложение С

Данные по безопасности материалов

ВСЕ ДЕТАЛИ И ЗАГОТОВКИ ИЗ ПОЛИИМИДА VESPEL® ПРИСУТСТВУЮТ В СПИСКЕ СИНОНИМОВ VSP001

Химическое вещество/идентификация компании

Обозначение материала

VESPEL® зарегистрированный торговый знак DuPont.

Корпоративный номер MSDS № DU003855

Торговые наименования и синонимы

VESPEL® SP1, SP3, SP21, SP22, SP211, SP221,

VESPEL® SP1D, SP21D, SP22D, SP211D, SP221D,

ST20000, ST2000D, ST2005, ST2005D, ST2010, ST2010D,

VESPEL® ST2030, ST2030D

Идентификация компании

Производитель/распространитель

DuPont

Polymers

1007 Market Street Wilmington, DE 19898, U.S.A.

Телефоны:

Информация об изделиях 1-800-441-7515

Аварийная ситуация при транспортировке 1-800-424-9300

Срочная медицинская помощь 1-800-441-3637

Информация о химическом составе и ингредиентах

Химическое вещество	Номер CAS	%
Поли-N,N'-(p,p'-оксидифенилен) пиромеллитимид	25038-81-7	50-100
Присутствует только в SP21, 22, 211, 221, и серии ST: Графит (не присутствует в ST2000)	7782-42-5	2-40
Присутствует только в SP3: Дисульфид молибдена	1317-33-5	15
Только в SP211, 221 (10-15%) и в типах D (<1%) Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	9002-84-0	0,2-15

Примечания

Этот материал, насколько нам известно, не содержит токсичных веществ, перечисленных в Законодательных актах США: Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986, Раздел 313 Часть III; и 40 CFR часть 372.

Идентификация опасностей

Воздействие на состояние здоровья человека

Детали и заготовки из полиимида VESPEL® не представляют опасности для здоровья при отгрузке и транспортировке.

При машинной обработке материалов SP211, SP221 и материалов типов D могут выделяться частицы политетрафторэтилена (ПТФЭ). Обработка тупым инструментом и без охлаждения может привести к нагреву выше 260°C. При вдыхании паров перегретого (>260°C) или горящего ПТФЭ может вызвать «лихорадку полимерных паров» - кратковременное заболевание типа гриппа с повышением температуры, ознобом, иногда кашлем, продолжительностью около 24 ч. Курящие должны избегать попадания ПТФЭ в курительные принадлежности и табак. При перегревании или горении ПТФЭ также могут возникать небольшие количества фтористого карбонила и фтористого водорода.

Поли-N,N'-(p,p'-оксидифенилен) пиромеллитимид

Полимерная смола немного раздражает кожу, но не является кожным сенсibilизатором для животных. При одновременной ингаляции у животных наблюдался дискомфорт и затруднение дыхания (летальная концентрация для крыс LC₅₀ получаемая в течение 4 часов, составляет 15600 мг/м³). При многократном употреблении внутрь у животных наблюдалось снижение потребления пищи и снижение скорости приобретения веса.

У людей при избыточном воздействии на кожу может возникнуть раздражение, дискомфорт и сыпь. Вдыхание может вызвать раздражение верхних дыхательных путей, кашель и дискомфорт. Нет достоверных данных о вреде для человека при чрезмерном попадании в глаза или случайном употреблении внутрь. Значительные поражения кожи и системная токсичность после попадания внутрь маловероятны. Нет данных о том, что данное вещество является сенсibilизатором для человека.

Графит

Чрезвычайно низкая токсичность при употреблении внутрь наблюдалась у крыс (полученная перорально летальная доза составляет LD₅₀ > 5000 мг/кг). Это вещество не раздражает глаза. При долговременном вдыхании у человека могут развиваться хронические болезни легких с симптомами легочной недостаточности. Лица с хроническими легочными заболеваниями могут иметь повышенную подверженность вредным эффектам при чрезмерном вдыхании графита.

Дисульфид молибдена

Нет достоверной информации о риске для здоровья при чрезмерном воздействии этого вещества.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ)

Это вещество не раздражает кожу. В ингаляционных экспериментах на животных вдыхание высоких концентраций пыли ПТФЭ приводило к раздражению легких. Периодическое употребление внутрь не имело иных проявлений токсического воздействия, кроме изменения числа белых кровяных телец после длительного принятия дозировки (25% рациона в течение 90 дней). Опыты показали, что ПТФЭ не является токсичным веществом при развитии особей, не вызывает повреждений генома у животных или культуры клеток бактерий.

Последствия избыточного воздействия на людей

Вдыхание паров при перегревании ПТФЭ может вызвать «лихорадку полимерных паров» - кратковременное заболевание типа гриппа с повышением температуры, ознобом, иногда кашлем, продолжительностью около 24 ч. В литературе публиковались данные об устойчивом вредном воздействии на легкие, особенно у курящих, у которых наблюдались повторяющиеся случаи «лихорадки полимерных паров». Из-за осложняющих факторов, таких как смешанное воздействие и курение в течение длительного времени, существует большая неопределенность при установлении вредного воздействия. Защита от непосредственного воздействия также должна предотвратить развитие любых потенциальных хронических проявлений. Курящие должны избегать попадания ПТФЭ в курительные принадлежности и табак. Перед курением необходимо мыть руки. Значительные поражения кожи после контакта с веществом маловероятны. Нет данных о том, что вещество является сенсибилизатором для человека. При перегревании или горении ПТФЭ также могут возникать небольшие количества фтористого карбонила и фтористого водорода.

Вдыхание низких концентраций *фтористого водорода* может сразу вызвать кашель, удушье, резкое раздражение глаз и носоглотки. После бессимптомного периода в 1-2 дня может возникнуть жар, озноб, затрудненное дыхание, цианоз, отек легких. Острое или хроническое воздействие фтористого водорода может привести к поражению печени и почек.

Вдыхание, употребление внутрь, попадание на кожу и в глаза *фтористого карбонила* может сразу вызвать раздражение кожи, дискомфорт и появление сыпи, раздражение глаз, воспаление роговицы и конъюнктивы, раздражение верхних дыхательных путей, временное раздражение легких, сопровождающееся кашлем, дискомфортом, затрудненным дыханием, поверхностным дыханием. Эти симптомы могут иметь отсроченный характер.

Пациенты с легочными заболеваниями могут обладать повышенной чувствительностью к избыточному воздействию продуктов термического разложения ПТФЭ.

Информация о канцерогенных эффектах

Вещества, присутствующие в материалах указанных выше торговых марок в концентрациях, равных или превышающих 0,1%, не перечислены в списках канцерогенов IARC, NTP, OSHA и ACGIH.

Оказание первой медицинской помощи

Первая помощь

Вдыхание

Никаких специфических мер не требуется, поскольку, как указывалось, вероятнее всего, данные материалы не токсичны при вдыхании. При необходимости проконсультируйтесь с врачом.

Попадание на кожу

Данные материалы скорее всего не представляют опасности при контакте с кожей, но мы рекомендуем промыть кожу после попадания вещества.

При попадании в глаза

Промывайте глаза большим количеством воды по крайней мере 15 минут. Вызовите врача.

Употребление внутрь

Никаких специфических мер не требуется, поскольку, как указывалось, вероятнее всего, данные материалы не токсичны при употреблении внутрь. При необходимости проконсультируйтесь с врачом.

Противопожарные меры

Воспламеняемость

Не горит без внешнего поддержания пламени

Пожароопасность и взрывоопасность:

При горении образуются такие опасные газы и пары, как окись углерода, углекислый газ, дым. При горении смол SP211, SP212 и типов D могут выделяться фтористый водород, фтористый карбонил, фторуглероды с низким молекулярным весом.

Способы тушения

Используйте способы, подходящие для тушения других материалов, расположенных вблизи.

Инструкции по тушению пожара

Требуется противогаз. При горении SP211, SP212 и типов D могут выделяться пары фтористого водорода, которые при соединении с водой образуют фтористоводородную кислоту. При уборке продуктов горения надо надеть *неопреновые* перчатки.

Меры при случайном выбросе

Меры предосторожности для персонала

Примечание: *Прежде чем приступить к уборке вещества, ознакомьтесь со способами тушения пожара и обращения с веществом (раздел для персонала).* Используйте подходящее защитное оборудование во время уборки.

Уборка пролитого вещества

Уберите неповрежденный и минимально загрязненный материал для повторного использования и утилизации. Убирайте материал при помощи лопаты или же подметания.

Обращение и хранение

Обращение с материалами (инструкция для персонала)

Избегайте загрязнения сигарет или табака пылью, содержащей указанные материалы.

Избегайте вдыхать пыль.

Обращение с материалами (процедуры)

Избегайте накопления пыли.

Допустимые дозы воздействия и защита персонала

Инженерные меры защиты

Используйте местную вентиляцию для проветривания от пыли, образующейся при резке и шлифовке материалов.

Индивидуальные меры защиты

Защита глаз и лица

Во время машинной обработки нужно надевать соответствующее защитное оборудование, например, защитные очки и очки с боковыми шторками.

Респираторы

Во время шлифовки, распилки и полировки материалов используйте воздухоочистительный респиратор, одобренный NIOSH/MSHA с картриджем или накопителем для пыли и влаги, если ожидается превышение нормативов содержания вещества в воздухе.

Руководство по допустимым уровням воздействия

Гигиенические нормативы (для рабочей зоны)

Все детали и заготовки из полиимида VESPEL® находятся в списке синонимов VSP001.

PEL (OSHA): Твердые частицы, не регулируемые другими нормативами
15 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для суммы взвешенных веществ
5 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для вдыхаемой фракции взвешенных веществ

Другие применимые гигиенические нормативы

Поли-N,N'-(p,p'-оксидифенилен) пиромеллитимид

PEL (OSHA): не установлен

TLV (ACGIH): не установлен

AEL (DuPont): 10 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для суммы взвешенных веществ
5 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для вдыхаемой фракции взвешенных веществ

Графит (отсутствует в марке полиимида ST-2000)

PEL (OSHA): 5 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для вдыхаемой фракции взвешенных веществ

TLV (ACGIH): 2 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для вдыхаемой фракции взвешенных веществ

AEL (DuPont): не установлен

Дисульфид молибдена

PEL (OSHA): 5 мг/м³, и растворимые соединения, как для молибдена
Нерастворимые соединения: 10 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, как для суммы взвешенных веществ

TLV (ACGIH): 10 мг/м³, нерастворимые соединения, как для молибдена

5 мг/м³, растворимые соединения, как для молибдена

как 8-ч средневзвешенные концентрации

AEL (DuPont): не установлен

Политетрафторэтилен (ПТФЭ)

PEL (OSHA): не установлен

TLV (ACGIH): не установлен

AEL (DuPont): 10 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для суммы взвешенных веществ
5 мг/м³, 8-ч средневзвешенная концентрация, для вдыхаемой фракции взвешенных веществ

Физико-химические свойства

Физические свойства

Точка плавления	нет
% летучих веществ	не применимо
Растворимость в воде	нерастворим
Запах	нет
Форма	твердые детали и заготовки
Удельный вес	от 1,33 до 1,67

Устойчивость и реакционная способность

Химическая устойчивость

Устойчив при нормальных температурах и условиях хранения

Разложение

Разлагается при нагревании.

Температура разложения: До 288°C заметного разложения не наблюдается. Продукт выдерживает кратковременное нагревание до 482°C без значительного разложения.

Нагревание до температур <288°C может приводить к выделению частиц вещества в окружающую среду, что может вызывать «лихорадку полимерных паров». При нагревании материалов SP211 и SP221 и типов D до температуры 400°C могут образовываться следовые количества фтористого водорода и фтористого карбонила. Чем выше температура, тем больше этих веществ может образоваться.

Полимеризация

Полимеризации не происходит.

Токсикологическая информация

Данные экспериментов над животными

Политетрафторэтилен (ПТФЭ)

Этот компонент не раздражает кожу. При одновременной ингаляции больших концентраций пыли, содержащей ПТФЭ, у животных наблюдалось раздражение легких.

Периодическое употребление внутрь не имело других наблюдаемых проявлений токсичного воздействия, кроме изменения числа белых кровяных телец после длительного воздействия (25% рациона в течение 90 дней). Опыты показали, что ПТФЭ не является токсичным веществом при развитии особей, не вызывает повреждений генома у животных или культур клеток бактерий.

Дисульфид молибдена

Летальная доза указанного вещества при попадании на кожу составляет $LD_{50} > 16000$ мг/кг (в экспериментах над кроликами). Летальная доза, принятая перорально, составляет $LD_{50} > 16000$ мг/кг (в экспериментах над крысами).

Постоянное вдыхание животными приводило только к возрастанию скорости дыхания. Однократный прием внутрь вызвал у животных только явную диарею. Продолжительный прием внутрь не имел вредных последствий.

Экологическая информация

Экотоксикологическая информация

Токсичен для водных организмов.

Ожидается, что токсичность будет очень мала, поскольку данное вещество нерастворимо в воде.

Утилизация

Утилизация отходов

Предпочтительны следующие способы утилизации: (1) повторное использование, (2) сжигание с улавливанием энергии, (3) захоронение отходов. Высокая теплотворная способность этого материала увеличивает привлекательность второго способа утилизации отходов – для тех отходов, которые нельзя использовать повторно. Однако мусоросжигательная установка должна быть снабжена улавливателем кислотных продуктов горения. При обращении, хранении, транспортировке и утилизации материала нужно следовать действующему федеральному законодательству, законам штатов/провинций, местному законодательству.

Информация по транспортировке

Отгрузка и транспортировка

Наименование при транспортировке Не регулируется Министерством транспорта США

Информация о применимых нормах законодательства

Федеральное законодательство США

Статус в инвентаризации TSCA Подлежит инвентаризации как материал для коммерческих целей

Законодательство штатов (в США)

Согласно настоящему Бюллетеню по безопасному обращению с материалами, при производстве указанных в нем продуктов не используются вещества, включенные в списки опасных веществ на уровне штатов, исключение составляют:

Вещества, включенные штатом Пенсильвания в список опасных веществ, присутствующих в материале в концентрациях 1% или более (для особо опасных – 0,01% или более): графит в марках полиимида SP21, 22, 211, 221 и в типах ST. Политетрафторэтилен в марках SP211 и 221. Политетрафторэтилен включен в список опасных веществ, но мы считаем, что он был включен в этот список по ошибке, и обращались с иском об исключении этого вещества из списка.

Предостережение: вещества, известные штату Калифорния как вызывающие рак, врожденные пороки развития, другие репродуктивные пороки – не известны.

Вещества, включенные штатом Нью-Джерси в список опасных для рабочего места веществ, присутствующих в материале в концентрациях 1% или более (для веществ, известных как канцерогены, мутагены или тератогены – 0,1% или более): дисульфид молибдена.

Прочие сведения

Рейтинг Национальной ассоциации пожарной безопасности США (NFPA, NPCA-HMIS)

Опасность для здоровья	2
Огнеопасность	1
Реакционная способность	0

Дополнительная информация

Медицинское использование – предостережение: Не используйте этот материал в хирургии для постоянной имплантации. О других применениях в медицинских целях – см. информационный бюллетень DuPont № H-50102.

Данные, представленные в этом Бюллетене, по безопасному обращению с материалами относятся только к указанным в нем материалам и не применимы, если указанные материалы используются в сочетании с другим материалом или в каких-либо промышленных процессах.

Ответственный за Бюллетень по безопасному обращению с материалами: Дж. П. Боллмейер

Адрес: DuPont Engineering Polymers

Chestnut Run Plaza 713

Wilmington, DE 19880-0713

Телефон: 302-999-4257

За дальнейшей информацией о конструкционных полимерах обращайтесь в региональные офисы:

Интернет-адрес: <http://dupont.com/vespel>

EUROPE

Belgique / België

Du Pont de Nemours (Belgium)
BVBA-SPRL
Antoon Spinostraat 6
B-2800 Mechelen
Tel. (015) 44 15 27
Telefax (015) 44 14 08

Deutschland

Du Pont de Nemours
(Deutschland) GmbH
DuPont Straße 1
D-61343 Bad Homburg
Tel. (06172) 87 0
Telefax (06172) 87 27 01

España

Du Pont Ibérica S.A.
Edificio L'IIIa
Avda. Diagonal 561
E-08029 Barcelona
Tel. (3) 227 60 00
Telefax (3) 227 62 00

France

Du Pont de Nemours (France) S.A.
137, rue de l'Université
F-75334 Paris Cedex 07
Tel. (01) 45 50 65 50
Telefax (01) 47 53 09 67

Italia

Du Pont de Nemours Italiana S.r.L.
Via Volta, 16
I-20093 Cologno Monzese
Tel. (02) 25 30 21
Telefax (02) 25 30 23 06

Österreich

Biesterfeld Interowa GmbH & Co. KG
Bräuhausgasse 3-5
P.O. Box 19
AT-1051 Wien
Tel. (01) 512 35 71-0
Telefax (01) 512 35 71-31
e-mail: info@interowa.at
internet: www.interowa.at

Schweiz / Suisse / Svizzera

Dolder AG
Immengasse 9
Postfach 14695
CH-4004 Basel
Tel. (061) 326 66 00
Telefax (061) 322 47 81
Internet: www.dolder.com

United Kingdom

Du Pont (U.K.) Limited
Maylands Avenue
GB-Hemel Hempstead
Herts. HP2 7DP
Tel. (01442) 34 65 00
Telefax (01442) 24 94 63

ASIA-PACIFIC

Japan

DuPont K.K.
Arco Tower
8-1, Shimomeguro 1-chome
Meguro-ku, Tokyo 153-0064
Tel. 03-5434-6989
Telefax 03-5434-6982

Taiwan/China

DuPont Taiwan Limited
13th Floor, Hung Kuo Building
167, Tun Hwa North Road
Taipei, Taiwan 105
Tel. 02-719-1999
Telefax 02-712-0460

UNITED STATES

DuPont Engineering Polymers
Pencader Site
Newark, DE 19714-6100
Tel. 800-222-VESP
Telefax (302) 733-8137

Информация, содержащаяся в этом документе, соответствует нашим знаниям о предмете на момент публикации. Эта информация может быть пересмотрена по мере приобретения новых знаний и опыта. Представленные здесь данные находятся в пределах нормального диапазона свойств продукта, относятся только к указанным в нем материалам и не применимы, если указанные материалы используются в сочетании с другими материалами или добавками или в каких-либо промышленных процессах, если специально не оговорено иное. Представленные здесь данные не должны использоваться для определения пределов технических характеристик. Нельзя разрабатывать проектную документацию только на основании этих данных. Эти данные опубликованы не с целью заменить любые испытания, которые могут потребоваться Вам для определения применимости конкретного материала для Ваших конкретных целей. Поскольку DuPont не может предвидеть всех вариантов реального конечного использования данного продукта, DuPont не принимает никаких гарантийных обязательств и отказывается от любой ответственности в связи с любым использованием информации, содержащейся в этом документе. Никакая часть этой публикации не может считаться разрешением на деятельность или рекомендацией нарушить какие-либо патентные права.

Предостережение: Не используйте этот продукт в медицинских целях для постоянной имплантации. О других применениях в медицинских целях см. «Сообщение DuPont о мерах предосторожности при использовании в медицине».



The miracles of science™