

# Прямоугольные электрические соединители.

## Основные вопросы теории и практики механической обработки пластмасс

**Изучение и практическое использование закономерностей процесса резания пластмасс позволяет более эффективно управлять им, с целью обеспечения необходимого качества обрабатываемых поверхностей и требуемой точности, а также повышения производительности и эффективности обработки.**

**Александр Сафонов  
Леонид Сафонов**

edet@online.debryansk.ru

### Введение

Основным методом получения изоляторов современных электрических соединителей является метод формования — литье под давлением, прессование и т. п. Однако этот метод не всегда обеспечивает получение отдельных элементов изоляторов с необходимой точностью. К тому же часто возникают вопросы экономической целесообразности изготовления сложной высокоточной технологической оснастки, предусматривающей оформление всех точных конструктивных элементов изолятора. Кроме того, существует практика изготовления определенной номенклатуры изоляторов и отдельных комплектующих для них из стандартных пластмассовых профилей методом механической обработки — разрезкой, точением, сверлением, фрезерованием, шлифованием и др. Поэтому вопросам механической обработки пластмасс необходимо уделять определенное внимание.

Продолжительная практика обработки различных типов пластмасс резанием на предприятиях отрасли, в том числе и на ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь»» позволила обобщить накопленные данные о технологических возможностях некоторых основных видов обработки.

Наиболее точные размеры (6–8-й качества) при наименьшей шероховатости обработки поверхности ( $Ra = 0,16-1,25\text{мкм}$ ) достигаются шлифованием, чистовым точением и растачиванием, развертыванием. Другие методы обработки (сверление, фрезерование) дают более высокую шероховатость и менее точные размеры обработанных поверхностей.

Технологические возможности некоторых видов обработки представлены в таблице 1.

Пользуясь данными таблицы 1, можно ориентировочно определить вид механической обработки, соответствующий конкретным требованиям.

Минимальная шероховатость и наивысшая точность обработки, которые можно получить с помощью обработки резанием, колеблются в достаточно широких пределах и зависят от большого числа факторов. Главными из них являются марки обрабатываемого и инструментального материалов, геометрические параметры и качество заточки режущего инструмента, режимы резания, состояние приспособлений и оборудования.

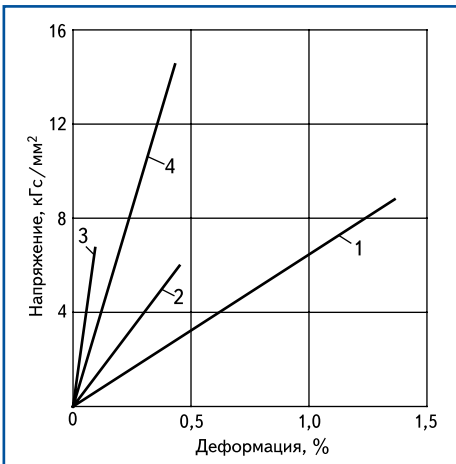
### Закономерности процесса резания пластмасс

Попытка механически перенести закономерности процесса резания металла на процесс резания пластмасс, как показала практика, успеха не имеет, поскольку пластмассы имеют специфические свойства, которые и обуславливают особенности процесса их резания. Пластмассы по сравнению с металлами имеют малую плотность, низкие механические характеристики при большом их колебании, анизотропию свойств, низкие теплостойкость и теплопроводность и т. д., поэтому совпадения закономерностей процесса их резания даже теоретически ожидать невозможно.

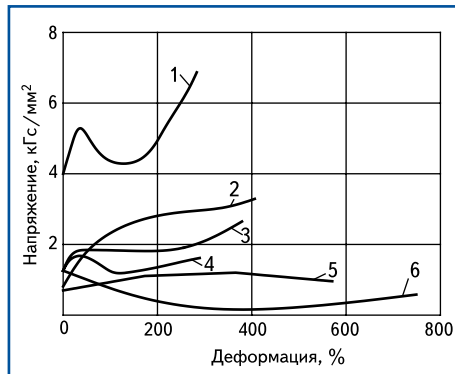
Процесс резания пластмасс необходимо рассматривать как самостоятельный процесс, имеющий свои закономерности и специфику. Изучение и практическое использование закономерностей процесса резания пластмасс позволяет более эффективно

**Таблица 1.** Технологические возможности обработки пластмассовых деталей резанием

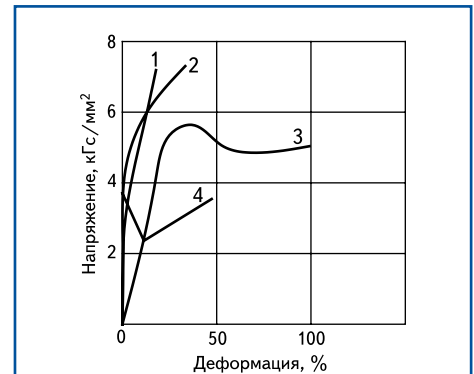
Вид обработки	Пресс-порошки с различными наполнителями; слоистые пресс-материалы, волокнистые		Полистирол, фторопласт	
	Достижимый качество	Ra, мкм	Качество	Ra, мкм
Наружное и внутреннее шлифование	6; 7	0,16–0,63	6; 7; 8	0,16–0,63
Двухкратное развертывание	6; 7	0,63–1,25	6; 7	0,16–0,63
Чистовое точение	7; 8	0,63–1,25	8; 9	0,63–1,25
Чистовое растачивание	8; 9	0,3–1,25	8; 9	0,63–1,25
Однократное развертывание	7; 8	1,25–2,5	7; 8	1,25–2,5
Сверление	8; 9; 10	2,5–4	10	1,25–4
Чистовое фрезерование	10	1,25–3	11	1,25–2,5
Чистовое точение	11; 12; 13	5–10	12; 13	2,5–5
Черновое фрезерование	11; 12; 13	16–20	12; 13	10–15



**Рис. 1.** Зависимость напряжения от деформации для термореактивных пластмасс:  
1 — фенопласт ненаполненный;  
2 — фенопласт со слюдяным наполнителем;  
3 — полиэфир; 4 — стеклотекстолит



**Рис. 2.** Зависимость напряжения от деформации для термопластов с высоким коэффициентом удлинения:  
1 — полиамид; 2 — полиуретановый каучук;  
3 — политетрафторэтилен;  
4—6 — полиэтилен (соответственно, плотность  $\rho = 0,930; 0,923; 0,914 \text{ г/см}^3$ )



**Рис. 3.** Зависимость напряжения от деформации для термопластов со средним коэффициентом удлинения: 1 — полиметилметакрилат; 2 — ацеталь; 3 — поликарбонат; 4 — полистирол ударопрочный

управлять им с целью повышения производительности и эффективности обработки. Сравнение закономерностей процесса резания пластмасс с закономерностями процесса резания металлов необходимо лишь для того, чтобы учесть их различие при обработке на металлорежущих станках с использованием металлорежущего инструмента.

Методы обработки деталей из пластмасс большей частью зависят от используемого оборудования и инструмента. Однако режущих инструментов, оборудования и технологических методов, специально предназначенных для механической обработки пластмассовых деталей, крайне недостаточно. Часто используется инструмент, предназначенный для обработки металла и дерева. Этим в значительной степени обусловлены трудности эффективной обработки пластмасс резанием, усугубляемые дополнительно многообразием видов и классов пластмасс, применяемых для изготовления пластмассовых деталей для электрических соединителей, и недостаточностью данных о свойствах, характеризующих их обрабатываемость.

Например, при детальном изучении обработанных резанием поверхностей пластмассовых деталей они часто оказываются шерохо-

ватыми и покрытыми трещинами и рисками. В других случаях обнаруживается, что чрезмерное тепло трения, возникающее в процессе резания, вызывает прижоги на поверхностях реактопластов и оплавление поверхностей термопластов, в результате чего возникает необходимость дополнительной обработки деталей. Можно обнаружить также выкрошивание и чрезмерный износ режущих кромок инструмента.

Причины всех этих проблем заключаются в недостаточном знании и учете реологических и термических характеристик пластмасс, к которым относятся удельная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент теплового расширения и др. Поэтому с целью исключения отмеченных недостатков, возникающих в процессе механической обработки пластмассовых деталей, необходимо ознакомиться с некоторой информацией о режимах резания и конструкциях режущего инструмента, необходимых для качественной их обработки. Кроме того, нужно проанализировать механизм стружкообразования, силы и деформации, развивающиеся в полимерном материале в процессе резания, рост температуры во время резания и другие подобные явления.

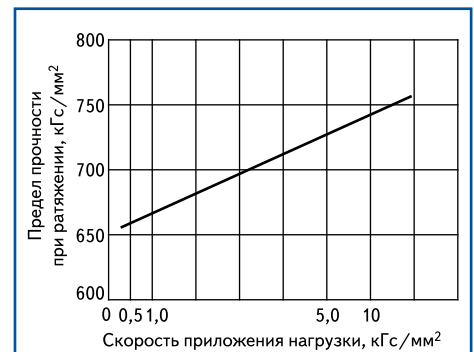
Первый, важный шаг для понимания процесса резания пластмасс — это анализ процесса резания однолезвийным инструментом. Факторы, влияющие на процесс резания пластмасс, представлены в таблице 2.

При обработке кругами или абразивными лентами, а также многолезвийным инструментом (сверление, фрезерование и т. д.) методика анализа процесса резания усложняется. В этом случае резание следует рассматривать как сумму режущих действий, производимых однолезвийными инструментами.

Кроме факторов обработки, на процесс резания влияют механические свойства обрабатываемых пластмасс. Типичные кривые зависимости «напряжение–деформация» для представителей основных групп пластмасс приведены на рис. 1–3.

Судя по приведенным графикам, зависимость «напряжение–деформация» для различных групп пластмасс резко отличается

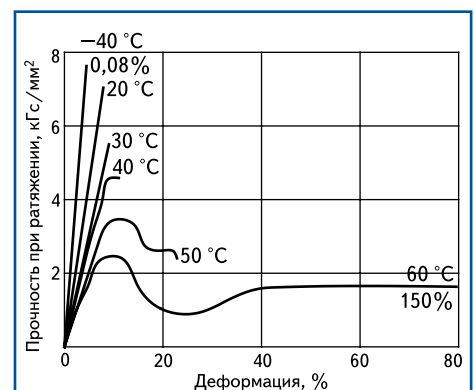
друг от друга, и поэтому типы стружки, а соответственно, внешний вид и качество обрабатываемых поверхностей будут различны. Механические свойства пластмасс зависят не только от типа полимера, но и в большей степени — от скорости его деформации и температуры окружающей среды. Например, для полиметилметакрилата предел прочности при растяжении прямо пропорционален логарифму скорости нагружения (рис. 4).



**Рис. 4.** Изменение предела прочности при растяжении в зависимости от логарифма скорости приложения нагрузки для полиметилметакрилата

Зависимость «напряжение–деформация» от температуры можно проследить на графике (рис. 5).

С повышением температуры пластмассы становятся вязкими, то есть напряжение падает,



**Рис. 5.** Зависимость напряжения от деформации для полиметилметакрилата при различной температуре

**Таблица 2.** Факторы, влияющие на процесс резания пластмасс

Факторы	Область преимущественного влияния
Конструкция режущего инструмента (геометрия инструмента)	
Передний угол $\gamma$	Стружкообразование
Задний угол $\alpha$	Износ инструмента
Радиус при вершине $r$	Шероховатость обработанной поверхности
Материал инструмента	Износ инструмента
Режимы резания	
Глубина резания (глубина на зуб)	Стружкообразование и шероховатость обработанной поверхности
Скорость резания	
Подача	
Рабочая температура окружающей среды	
Вид охлаждения	Выделение тепла, оплавление и появление прижогов

а деформация возрастает. Прочность при разрыве и изгибе, как и твердость, уменьшаются.

Таким образом, с повышением температуры излом становится пластичным, а при ее понижении — хрупким. Следовательно, тип формируемой в процессе резания стружки будет изменяться с ростом температуры, при которой происходит резание. Влияние температуры проявляется для термопластов более критично, чем для реактопластов.

Относительное сопротивление растяжению и сжатию также влияет на обрабатываемость пластмасс. У реактопластов сопротивление сжатию в 5–6 раз выше, чем сопротивление растяжению, а у термопластов, за исключением некоторых видов, наоборот, сопротивление при растяжении выше, чем при сжатии. Таким образом, большая часть пластмасс обладает более высоким сопротивлением разрушению при сжатии, чем при растяжении.

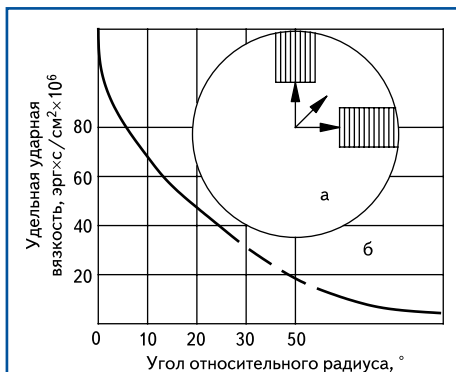
Необходимо эффективно использовать это свойство термопластмасс. Для этого необходимо выбирать геометрию режущего инструмента и режимы резания, способствующие разрушению при растягивающих напряжениях. Этой цели отвечает режущий инструмент с большим передним углом, при применении которого уменьшается работа резания. Существует, однако, установленное опытом наибольшее допустимое значение переднего угла, поскольку обработка некоторых видов пластмасс инструментом с малым углом заострения может способствовать хрупкому разрушению с образованием прерывистой стружки надлома и, вследствие этого, шероховатой поверхности.

Структура некоторых видов пластмасс неоднородна, и это влияет на их поведение при обработке резанием. Таковы терморезистивные слоистые пластики. Поэтому при сверлении подобных материалов качество поверхности отверстий, просверленных вдоль и поперек слоев, различно, даже при одинаковых условиях и режимах сверления. Подобное положение наблюдается и при обработке резанием формованных деталей, ориентированных вдоль линии течения материала. На рис. 6 показано, как анизотропная структура полистирола, переработанного методом литья под давлением, влияет на его удельную ударную вязкость.

Образцы для испытаний вырезались из отливки вдоль направления потока расплава, перпендикулярного потоку и под промежуточными углами. Удельная ударная вязкость образцов измерялась в зависимости от угла относительного радиуса, под которым они были вырезаны. Установлено, что с увеличением угла к направлению течения расплава удельная ударная вязкость снижается.

Другой фактор, влияющий на процесс резания при обработке пластмасс, — их тепловые свойства: удельная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент теплового расширения и температура размягчения.

Удельная весовая теплоемкость для большинства пластмасс находится в пределах 0,2–0,4 кал/(г·°С) и превышает удельную весовую теплоемкость металлов. Однако, поскольку плотность пластмасс ниже, чем плотность



**Рис. 6.** Влияние ориентации материала на удельную ударную вязкость полистирола, переработанного методом литья под давлением: а — положение образцов в отливке; б — удельная ударная вязкость в зависимости от ориентации образца в отливке

металлов, удельная объемная теплоемкость пластмасс ниже, чем у металлов. Поэтому если к равным объемам пластмассы и металла подвести одинаковое количество тепла, то температура пластмассы будет выше.

Теплопроводность пластмасс в 500–600 раз ниже, чем у металлов, следовательно, основная часть тепла, выделяемая за счет трения металла инструмента о пластмассу, будет отводиться в инструмент. Долю тепла, которая передается инструменту, можно вычислить по формуле:

$$Q = \lambda_u / (\lambda_u + \lambda_n), \quad (1)$$

где  $\lambda_u, \lambda_n$  — коэффициенты теплопроводности материала инструмента и пластмассы.

Расчет показывает, что тепло, передаваемое стальному инструменту, составляет от 99,2 до 99,8% всего выделяемого тепла, остальная часть отводится в пластмассу.

Коэффициент теплового расширения пластмасс  $(1,5–10) \times 10^{-5}$  мм/(мм·°С) больше (иногда в 10 раз), чем у стали. Следовательно, расширение пластмасс, вызванное теплом, выделяемым при механической обработке, приводит к дальнейшему ухудшению условий резания, так как усиливается трение, что приводит к дополнительному выделению тепла.

Температуры размягчения и деструкции пластмасс относительно низки, поэтому под воздействием генерируемого тепла трения проявляется склонность к подгоранию у реак-

топластов, оплавлению у термопластов и к изменению цвета у пластмасс обоих классов.

### Процесс стружкообразования

Процесс образования стружки при резании пластмасс в связи с их высокой упругостью происходит главным образом в результате упругих деформаций. Эта закономерность процесса стружкообразования характерна только для пластмасс. При резании пластмасс образуется стружка нескольких различных типов (табл. 3).

**Таблица 3.** Классификация типов стружки, образующейся при резании пластмасс

Стружка	Факторы стружкообразования
<b>Непрерывная</b>	
Сливная	Интенсивная упругая деформация
Скальвания	Непрерывное скальвание под воздействием напряжения сдвига
<b>Прерывистая</b>	
Простая скальвания	Пластичное разрушение под воздействием напряжения простого сдвига
Сложная скальвания	Пластичное разрушение под воздействием напряжения сдвига и сжатия или напряжения растяжения
Стрещинами	Упругое разрушение, хрупкое разрушение

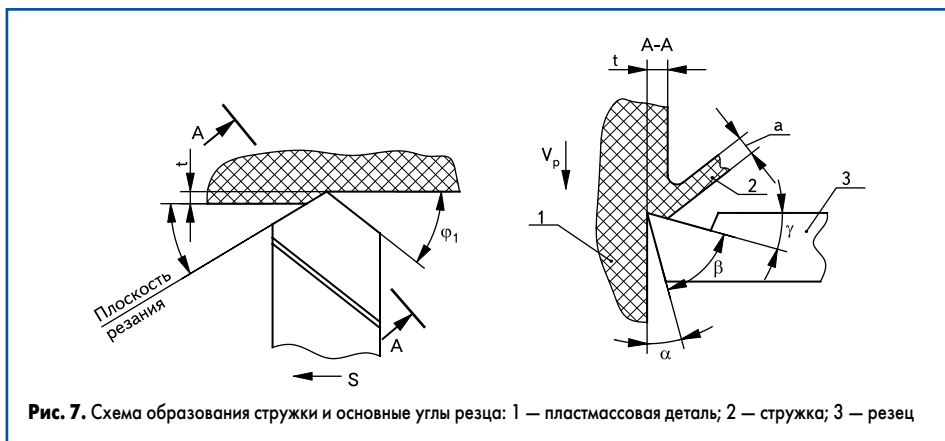
Практически при всех видах механической обработки пластмасс процесс образования стружки происходит почти одинаково, поэтому его можно рассмотреть на примере однолезвийного инструмента (рис. 7).

Процесс механической обработки осуществляется за счет взаимного перемещения обрабатываемого изделия и режущего инструмента со скоростью резания  $v_p$ , в результате чего происходит снятие стружки. Режущая грань резца образует передней и задней поверхностями резца (сечение А-А на рис. 7). Передняя поверхность с основной (горизонтальной) плоскостью образует передний угол  $\gamma$ , а задняя и вертикальная плоскости образуют задний угол  $\alpha$ , который определяет силу трения резца об обрабатываемую поверхность и обычно выбирается в пределах 10–20°.

Угол заострения резца  $\beta$  зависит от углов  $\alpha$  и  $\gamma$ :

$$\beta = 90 - \alpha + \gamma. \quad (2)$$

Если посмотреть на резец в плане, то плоскость резания расположена к обрабатываемой



**Рис. 7.** Схема образования стружки и основные углы резца: 1 — пластмассовая деталь; 2 — стружка; 3 — резец

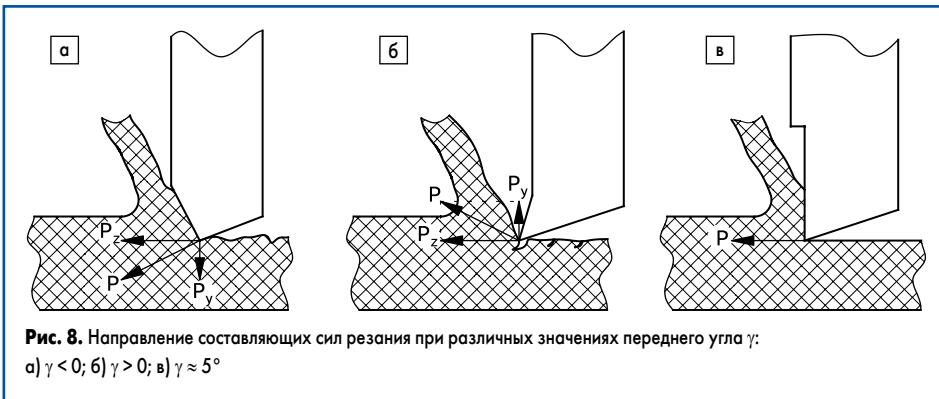


Рис. 8. Направление составляющих сил резания при различных значениях переднего угла  $\gamma$ : а)  $\gamma < 0$ ; б)  $\gamma > 0$ ; в)  $\gamma \approx 5^\circ$

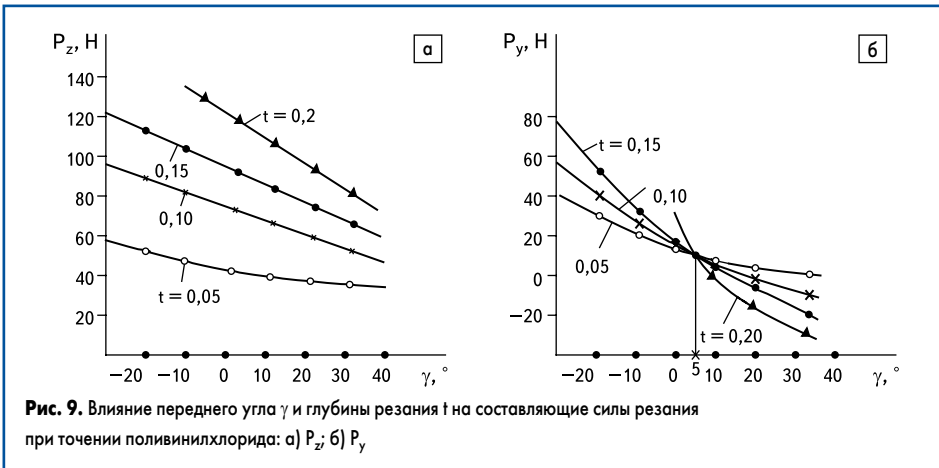


Рис. 9. Влияние переднего угла  $\gamma$  и глубины резания  $t$  на составляющие силы резания при точении поливинилхлорида: а)  $P_z$ ; б)  $P_y$

поверхности под углом  $\phi$ , а вспомогательная задняя поверхность — под углом  $\phi_1$ .

Скорость перемещения изделия относительно резаца называется скоростью резания ( $v_p$ ), а толщина срезаемого слоя с поверхности детали ( $t$ ) — глубиной резания. Резец перемещается в процессе резания относительно детали, то есть происходит подача ( $S$ ), которая выражается в миллиметрах за один оборот или один проход резаца. Таким образом, условия резания задаются геометрией резаца (углами  $\gamma$ ;  $\alpha$ ;  $\phi$  и  $\phi_1$ ) и режимами резания ( $v_p$ ,  $t$ ,  $S$ ).

При снятии стружки образуются силы, под действием которых происходит деформация полимера. Резец при движении сжимает слой полимера, и на передней поверхности резаца возникает сила, направление которой зависит от угла  $\gamma$  и силы трения стружки о резец (рис. 8).

Если передний угол отрицательный ( $\gamma < 0$ ), то полимер испытывает сжимающие силы, так как вектор  $P_y$  направлен в сторону обрабатываемого изделия (рис. 8а). Под действием сжимающих усилий полимер деформируется, а после прохода режущей кромки происходит упругое восстановление размеров, и поверхность детали прижимается к плоскости резания. В связи с этим увеличиваются силы трения, и происходит разогрев детали в зоне резания, нарушается точность обработки и ухудшается чистота поверхности.

Если передний угол, наоборот, очень велик ( $\gamma > 0$ , рис. 8б), то составляющая часть нормальной силы  $P_y$  направлена в противоположную сторону от обрабатываемой детали, обрабатываемая поверхность испытывает растягивающие напряжения, и происходит образование стружки с выкрошиванием, обра-

зуются вырывы на поверхности обрабатываемой детали. На основании длительного опыта установлено, что оптимальным углом  $\gamma$  является такой угол для конкретной пластмассы, когда  $P_y \approx 0$ .

Влияние  $\gamma$  на векторы силы резания  $P_z$  и  $P_y$  рассмотрим на примере точения поливинилхлорида (рис. 9).

Как видно на рис. 9б, сила  $P_y$  достигает минимального значения при  $\gamma \approx 5^\circ$ , однако оптимальное значение угла  $\gamma$  не постоянно, а изменяется в зависимости от вида полимера и скорости резания. Сила резания  $P_z$  увеличивается с ростом глубины резания и уменьшается при увеличении  $\gamma$ .

Качество обрабатываемой поверхности в основном зависит от подачи (рис. 10) и наличия радиуса закругления у вершины резаца (из практики установлен оптимальный радиус  $r \approx 0,5$  мм). При обработке термопластичных полимеров шероховатость поверхности не-

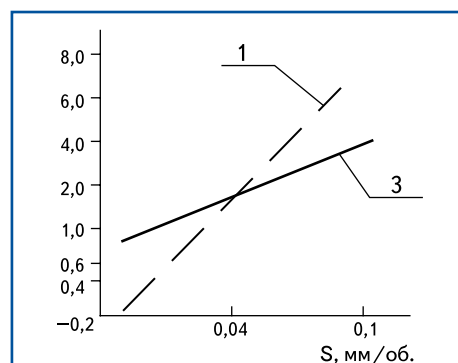


Рис. 10. Зависимость шероховатости поверхности от подачи при точении поливинилхлорида: 1 — алмазный резец; 2 — твердосплавный резец

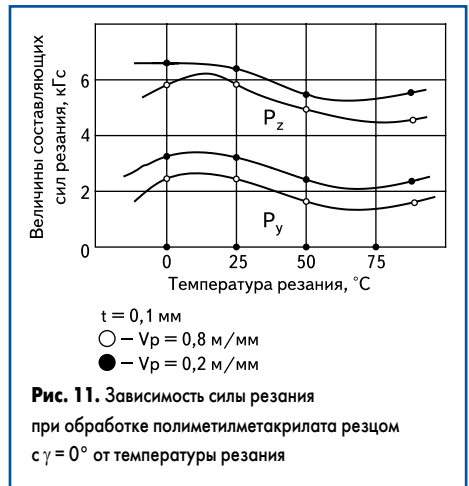


Рис. 11. Зависимость силы резания при обработке полиметилметакрилата рецом с  $\gamma = 0^\circ$  от температуры резания

сколько снижается при увеличении скорости резания, однако определяющими факторами остаются подача и радиус закругления.

Процесс резания зависит также от температуры в зоне стружкообразования. С повышением температуры изменяется тип стружки и отношение «напряжение–деформация». Излом становится пластичным с повышением температуры и хрупким при ее понижении. Зависимость между температурой резания и составляющими силами резания при обработке полиметилметакрилата представлена на рис. 11.

Составляющие силы резания несколько уменьшаются при повышении температуры.

### Оптимальные режимы резания

Тип образующейся стружки, геометрия режущего инструмента, применяемые режимы резания, механические свойства пластмасс и их изменение при повышенной температуре, тепловые характеристики пластмасс — все это влияет на результаты обработки резанием.

Всегда надо стремиться получить непрерывную стружку, чтобы избежать образования тепла и свести к минимуму деформацию материала в процессе резания. Для этого желательно работать режущими инструментами с передним углом критического или большего значения, которые срезают непрерывную стружку при минимальной деформации. Очень важен также выбор режимов резания, особенно толщины срезаемого слоя на зуб, определяемой подачей. Как только стружка становится большой по толщине, на обрабатываемой поверхности образуется много трещин. Однако если толщина стружки мала, то появляются прижоги или происходит оплавление обрабатываемой поверхности. Следовательно, надо выбирать такие режимы резания, которые обеспечивают оптимальную толщину стружки на зуб.

Как мы уже отмечали, образование в процессе резания избыточного тепла является крайне нежелательным, так как оно может вызвать прижоги или оплавление обрабатываемой поверхности. Рассмотрим, как образуется тепло в результате преобразования энергии, затрачиваемой на разрушение материала или отделение его частиц от всей массы обрабатываемого материала (зона I) энергии, расходуемой вследствие трения, возникающего между обрабатываемым материалом и передней (зона II),

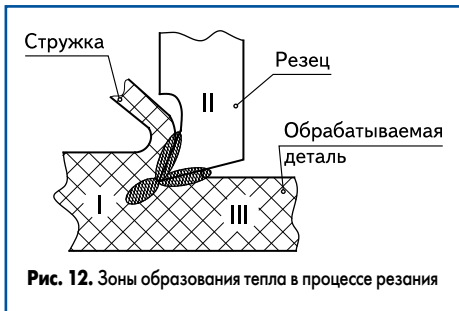


Рис. 12. Зоны образования тепла в процессе резания

а также задней (зона III) поверхностями режущего инструмента (рис. 12). Тепло, образуемое при отделении частиц материала, в большей степени зависит от толщины срезаемого слоя. При уменьшении толщины срезаемого слоя удельная сила резания, то есть резания на единицу площади, быстро возрастает. В свою очередь, удельная сила резания пропорциональна количеству тепла, образующегося при смене единицы объема обрабатываемого материала.

Эти же явления наблюдаются и при сверлении. На рис. 13 показана зависимость удельной силы резания от толщины срезаемого слоя при сверлении отверстия в детали, отлитой из полиэфира.

По данной зависимости можно сделать вывод, что образуемое на единице объема тепло быстро возрастает, когда толщина срезаемого слоя становится малой. Удельную силу резания при сверлении вычисляют по значениям осевой силы.

Рассмотрим данные по образованию тепла при различных видах механической обработки фенопласта (табл. 4).

По данным таблицы 4 ясно, что тепло, образующееся при шлифовании с очень малой толщиной срезаемого слоя, больше, чем соот-

Таблица 4. Количество тепла, образующегося при резании фенопласта

Вид обработки	Толщина срезаемого слоя, мм	Качество тепла, кал/см <sup>3</sup>
Точение	0,3	91
Строгание	0,03	143
Резка абразивным кругом	~0,001	430
Шлифование врезанием	~0,0001	6900

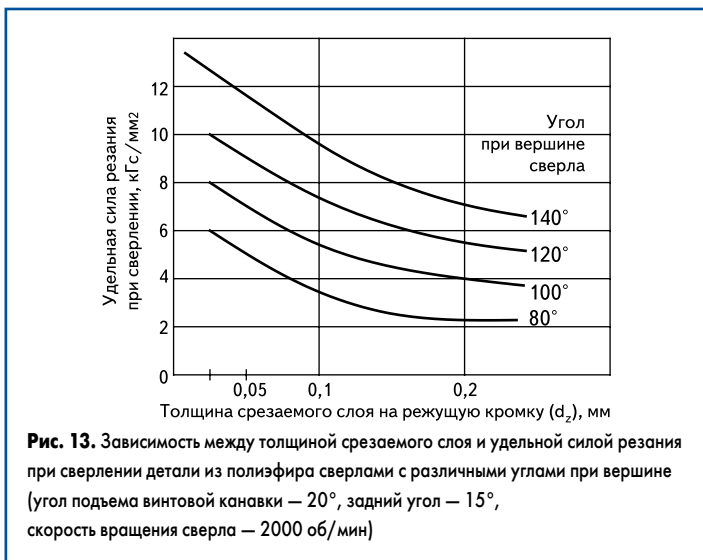


Рис. 13. Зависимость между толщиной срезаемого слоя и удельной силой резания при сверлении детали из полиэфира сверлами с различными углами при вершине (угол подъема винтовой канавки — 20°, задний угол — 15°, скорость вращения сверла — 2000 об/мин)

ветствующие значения, полученные при токарной обработке пластмасс. Отсюда можно сделать вывод, что следует выбирать режимы резания с наибольшими значениями толщины срезаемого слоя, с тем, чтобы уменьшить количество тепла, образующегося при затратах энергии на отделение частиц обрабатываемого материала.

Чтобы свести к минимуму трение между стружкой, снимаемой при резании, и передней поверхностью режущего инструмента и, соответственно, тепловыделение, следует полировать переднюю поверхность инструмента до максимально возможного класса чистоты. Трение между задней поверхностью инструмента и обрабатываемым материалом наиболее сильно развивается у пластмасс с большим коэффициентом теплового расширения и у тех, что обладают свойством упругого восстановления. Следовательно, заднюю поверхность также необходимо полировать и вести обработку режущим инструментом с критическим передним и большим задним углами.

Тепло трения может вызвать повышение рабочей температуры режущего инструмента и тем самым увеличить вероятность появления прижогов или оплавления обрабатываемых поверхностей и, кроме того, отжиг или отпуск режущей кромки инструмента и снижение его стойкости.

Ввиду отрицательного влияния тепла на процессы обработки пластмасс желательно охлаждать во время резания инструмент и обрабатываемую деталь, так как только подбором соответствующих скоростей и геометрии режущего инструмента не всегда удается полностью устранить образование высоких температур в зоне резания. Для охлаждения необходимо применять сжатый воздух или любую охлаждающую жидкость, не оказывающую отрицательного влияния на обрабатываемую деталь и инструмент.

Критерием эффективности охлаждения может служить тип образующейся стружки. Если охлаждение эффективно, состояние стружки, например, при разрезке полистирола дисковой фрезой характеризуется наличием отдельных элементов и отсутствием оплавления. В случае перегрева стружка размягчается

и оплавляется, как это обычно наблюдается при обработке резанием термопластов без охлаждения. Создание нормального температурного режима в зоне резания является основным условием обеспечения требуемого качества и производительности процесса механической обработки.

**Анализ процесса резания однолезвийным инструментом**

Обработка режущим инструментом может быть описана как разновидность процесса управляемого разрушения. На рис. 14 приведена схема действия сил в процессе ортогонального резания.

Когда режущий инструмент продвигается в теле обрабатываемой детали в направлении резания, то на переднюю поверхность резца действует сила резания  $R'$ , которая является равнодействующей нормальной силы и силы трения.

Реакция  $R$  равнодействующей силы  $R'$  воздействует на обрабатываемый материал и является той силой, которая деформирует и разрушает его. Стружка видоизменяется в зависимости от особенностей режима обработки: глубины резания —  $t$ , скорости резания —  $v_p$ , геометрии режущего инструмента и рабочей температуры.

Измерения показали, что толщина стружки всегда больше глубины резания, а длина ее меньше, чем длина поверхности срезаемого слоя. Линия АВ (рис. 14) представляет кромку так называемой плоскости сдвига. Ниже этой линии материал не подвергается деформации, но над нею стружка и материал под воздействием внутреннего процесса сдвига деформированы.

Анализ процесса стружкообразования при резании металлов основывается главным образом на допущении, что поверхность сдвига есть плоскость, простирающаяся кверху от режущей кромки инструмента. Это допущение оказывается верным при обработке резанием и некоторых видов пластмасс, но не у всех видов пластмасс наблюдается образование плоскости сдвига, и ее наличие или отсутствие зависит также от режимов резания.

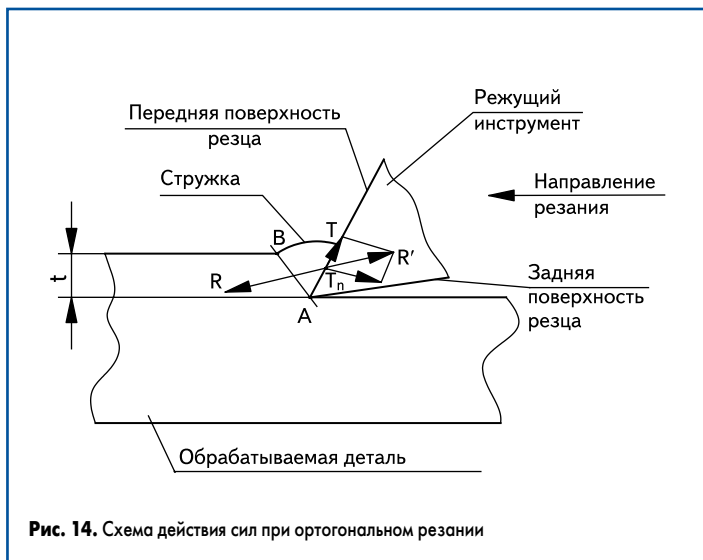


Рис. 14. Схема действия сил при ортогональном резании

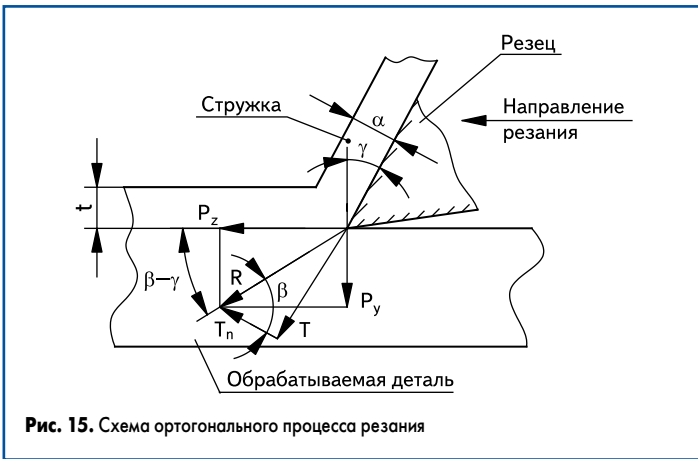


Рис. 15. Схема ортогонального процесса резания

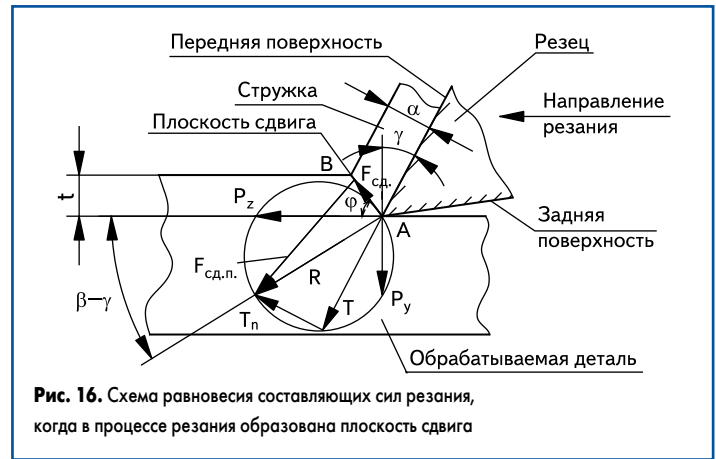


Рис. 16. Схема равновесия составляющих сил резания, когда в процессе резания образована плоскость сдвига

Рассмотрим некоторые важные факторы, влияющие на резание, не касаясь вопросов, относящихся к плоскости сдвига. Чтобы упростить анализ, целесообразно начать его с ортогонального или двухмерного процесса резания, так как в этом случае вся система действующих сил лежит в одной плоскости, как показано на рис. 15.

Равнодействующая сила  $R$  имеет две основные составляющие —  $P_z$  и  $P_y$ . Составляющая  $P_z$  — сила, действующая в направлении движения режущего инструмента, она определяет количество работы, необходимое для перемещения режущего инструмента на заданное расстояние. Составляющая  $P_y$  — сила, перпендикулярная к направлению резания, работы не производит. Обе составляющие вызывают сжатие обрабатываемого материала в процессе резания вдоль и перпендикулярно направлению резания. У передней поверхности инструмента силы  $T$  и  $T_n$  воздействуют на стружку. Сила  $T$  представляет собой сопротивление трению, которое встречает стружка при скольжении по передней поверхности резца. Сила  $T_n$  — нормальная сила.

Отношение  $T/T_n = \mu$  есть коэффициент трения между стружкой и резцом. Из системы действующих сил (рис. 16) можно вывести следующие уравнения:

$$T = P_z \sin \gamma + P_y \cos \gamma; \quad (3)$$

$$T_n = P_z \cos \gamma + P_y \sin \gamma; \quad (4)$$

$$\mu = \operatorname{tg} \beta = T/T_n \quad (5)$$

где  $\gamma$  — действительный передний угол резца, измеренный в плоскости, перпендикулярной к режущей кромке;  $\beta$  — угол трения;  $(\beta - \gamma)$  — угол, определяющий направление равнодействующей сил резания относительно направления движения резца.

Для более углубленного анализа процесса резания примем следующие допущения:

1. Режущая кромка инструмента острая и прямая, режет перпендикулярно направлению движения, а ее ширина больше ширины обрабатываемой детали; стружка не стекает в сторону.
2. Поверхность сдвига есть плоскость, направленная вверх от режущей кромки.
3. Режущая кромка образует поверхность сдвига при постоянной глубине резания,

поскольку материал перемещается относительно кромки с одинаковой скоростью.

4. Снимается непрерывная стружка без образования нароста на резце.
5. Задняя поверхность резца не вступает в контакт с обрабатываемой деталью. (В действительности контакт между ними часто наблюдается при малой скорости резания пластмасс, обладающих упругими свойствами.)

Угол сдвига  $\phi$  (угол между плоскостью сдвига и направлением резания) является наиболее важным фактором резания. Метод определения угла сдвига состоит в измерении коэффициента толщины стружки  $k$  (коэффициент поперечной усадки), который равен отношению глубины резания  $t$  к толщине стружки  $a$ :

$$k = \frac{t}{a} = \frac{AB \sin \phi}{AB \cos(\phi - \gamma)} = \frac{\sin \phi}{(\phi - \gamma)}. \quad (6)$$

Решая это уравнение относительно  $\phi$ , получим:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{k \cos \gamma}{1 - k \sin \gamma}. \quad (7)$$

Зная  $\phi$ , можно определить составляющие силы, действующей вдоль плоскости сдвига  $F_{cd}$  и перпендикулярной к плоскости сдвига  $F_{cd.n.}$ , с помощью следующих уравнений:

$$F_{cd} = P_z \cos \phi - P_y \sin \phi; \quad (8)$$

$$F_{cd.n.} = P_z \sin \phi + P_y \cos \phi = F_{cd} \operatorname{tg}(\phi + \beta - \gamma). \quad (9)$$

Площадь сдвига:

$$A_{cd} = (b \times t) / \sin \phi, \quad (10)$$

где  $b$  — ширина срезаемого слоя;  $t$  — глубина резания.

Среднее касательное  $\tau_{cd}$  и нормальное  $\sigma_{cd}$  напряжения на поверхности (плоскости) сдвига можно определить из уравнений:

$$\tau_{cd} = \frac{F_{cd}}{A_{cd}} = \frac{(P_z \cos \phi - P_y \sin \phi) \sin \phi}{b \times t}; \quad (11)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{F_{cd.n.}}{A_{cd}} = \frac{(P_z \sin \phi + P_y \cos \phi) \sin \phi}{b \times t}. \quad (12)$$

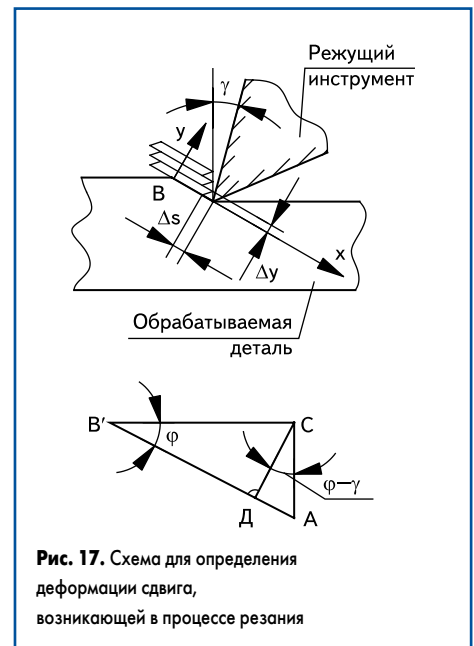


Рис. 17. Схема для определения деформации сдвига, возникающей в процессе резания

Деформация сдвига  $\epsilon$  определяется как отношение величин  $\Delta s / \Delta y$  (рис. 17):

$$\epsilon = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{AB'}{CD} = \frac{AD}{CD} + \frac{DB'}{CD} = \operatorname{tg}(\phi - \gamma) + \operatorname{ctg} \phi; \quad (13)$$

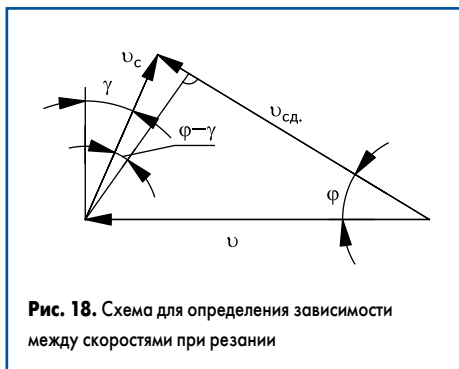
$$\epsilon = \frac{\cos \phi}{\sin \phi \times \cos(\phi - \gamma)}. \quad (14)$$

Существуют скоростные характеристики процесса резания:

1. Скорость резания ( $v$ ) — скорость перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали параллельно силе  $P_z$ .
  2. Скорость стружки ( $v_c$ ) — скорость перемещения стружки относительно режущего инструмента вдоль его передней поверхности.
  3. Скорость сдвига ( $v_{cd}$ ) — скорость перемещения стружки относительно обрабатываемой детали вдоль поверхности сдвига.
- На рис. 18 видно, что сумма векторов скорости резания и скорости стружки равна вектору сдвига, то есть:

$$v_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} v = k \times v; \quad (15)$$

$$v_{cd} = \frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma)} v = \epsilon \times \sin \phi \times v. \quad (16)$$



**Рис. 18.** Схема для определения зависимости между скоростями при резании

Наконец существуют зависимости, характеризующие энергию, затрачиваемую в процессе резания.

Общая затрата энергии на единицу объема материала, удаляемого при операциях ортогонального резания:

$$U = \frac{P_z v}{v \times b \times t} = \frac{P_z}{b \times t} \quad (17)$$

Энергия сдвига на единицу объема может быть получена из уравнения:

$$U_{cd} = \frac{F_{cd} \times v_{cd}}{v \times b \times t} = \tau_{cd} \left( \frac{v_{cd}}{v \times \sin \phi} \right) = \tau_{cd} \cdot \epsilon \quad (18)$$

Энергия трения на единицу объема:

$$U_{mp} = \frac{T v_{cd}}{v \times b \times t} = \frac{T \times k}{b \times t} \quad (19)$$

### Заключение

Как мы установили, обработка пластмасс резанием довольно часто становится необходимой операцией технологического процесса изготовления пластмассовых изоляторов. Она позволяет с наименьшими затратами получать готовые детали требуемых размеров и качества. В некоторых случаях, когда нужна особо высокая точность, механическая обработка —

единственно возможный способ обеспечения этих требований.

Теория резания пластмасс в значительной степени отличается от классической теории резания металлов, это объясняется в основном резким отличием свойств этих материалов. Попытка автоматического переноса закономерностей одного процесса на другой никогда не заканчивалась положительным результатом. Основной причиной этих неудач является недостаточное внимание к оценке реологических и термических характеристик пластмасс, так как они являются основой для назначения режимов резания, выбора материала и геометрии режущего инструмента.

При проведении механической обработки пластмассовых изоляторов особое внимание необходимо уделять поддержанию оптимальной температуры в зоне резания, так как от этого параметра в значительной степени зависит качество обработанной поверхности и точность геометрических размеров, а также стойкость режущего инструмента.

Поддержание заданного температурного режима в зоне резания обеспечивается многими факторами, такими как режимы резания ( $v$ ,  $t$ ,  $S$ ), материал (инструментальная сталь, P18, BK, синтетический или естественный алмаз и др.) и геометрия ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) режущего инструмента, а также охлаждение. Процессу охлаждения необходимо уделять особое внимание, так как в нем заложен большой резерв повышения производительности труда и обеспечения высокого качества обработки.

Известно, что теплопроводность пластмасс в 500–600 раз ниже теплопроводности металлов, поэтому эффективно отвод тепла из зоны резания можно производить только через резец или охлаждающую среду (воздух, газ, воду или другие нейтральные к пластмассам охлаждающие жидкости).

Существующие конструкции режущих инструментов с автономной системой охлаждения позволяют значительно снижать температуру в зоне резания за счет отвода тепла и его рассе-

ивания. Расчетами и опытным путем установлено, что доля тепла, передаваемая инструменту, составляет от 99,2 до 99,8% от его общего количества, получаемого в процессе резания, и, соответственно, всего 0,8–0,2% переходит в обрабатываемую деталь. Следовательно, необходимо сосредоточить основное внимание на охлаждении режущего инструмента.

Перечисленные нами виды обработки пластмассовых деталей имеют свои особенности, однако представленные общие закономерности процесса механической обработки и рекомендации по оптимизации его отдельных факторов остаются значимыми для каждого из них.

### Литература

1. Бортников В. Г. Основы технологии переработки пластических масс. Л.: Химия, 1983.
2. Старжинский В. Е., Фарберов А. М. и др. Точные пластмассовые детали и технология их получения. Минск: Наука / Техника, 1992.
3. Брагинский В. А. Точное литье изделий из пластмасс. Л.: Химия, 1977.
4. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение, 1974.
5. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение, 1987.
6. Чудновский А. Р., Кестельман Н. Я., Ахметчел Л. С. Изготовление и обработка деталей из пластмасс. М.: Машиностроение, 1967.
7. Яковлев А. Д. Технология изготовления изделий из пластмасс. Л.: Химия, 1968.
8. Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Электрические прямоугольные соединители. Требования к изоляторам и материалам для их изготовления // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 5.
9. Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Электрические прямоугольные соединители. Изготовление пластмассовых изоляторов повышенной точности // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 6.