

Usinage des polymères plastiques

Sources documentaires



PTFE Handbook by

DuPont Fluoroproducts
P.O. Box 80713
Wilmington, DE 19880-0713

De loin en loin en modélisme j'ai des pièces en polymère à usiner, essentiellement acétal (genre Delrin) ou PTFE (genre Téflon). Ces matériaux ont chacun des propriétés spécifiques. J'ai regroupé dans ces quelques pages des éléments techniques utiles éparpillés dans la littérature technique sur Internet. Il s'agit de données constructeur donc réputées fiables.

Avant d'usiner il est nécessaire d'avoir clairement à l'esprit les conditions d'utilisation de la pièce terminée : température, environnement vapeur, présence de graisse ou solvant, pression de fonctionnement, vitesse de déplacement,Ensuite on identifie la famille de plastique capable de remplir au mieux le cahier des charges.

Un modéliste utilise des quantités très faibles de matière, il devra donc se contenter des matières standards et en stock des détaillants. Il faut savoir cependant que pour une même base de polymère les variantes sont très nombreuses avec des différences de performances souvent saisissantes.

Le tableau en Annexe résume des conseils concernant les principales familles de polymères que l'on rencontre et des valeurs de base pour les usinages courant.

Téflon (PTFE-vierge)

Pour éviter tous les problèmes liés à la lubrification pour les modèles fonctionnant à la vapeur vive, je me suis intéressé un plus en détail au Téflon. Son utilisation pourrait être étendue aux segments de piston, presse-étoupe, paliers. Pour les paliers « froids » le Delrin pourrait être un choix intéressant à évaluer.

On distingue le PTFE-vierge, sans additif, des variantes contenant des charges (fibre de verre, carbone, graphite, poudre de bronze,...) charges qui modifient ses propriétés intrinsèques.

Principaux Téflon chargés

Téflon-Fibre de verre

Le pourcentage de fibre de verre va de 5 à 40 %. La fibre de verre diminue l'usure et dans une

moindre mesure la déformation sous charge. Les caractéristiques électriques du Téflon sont à peu près inchangées. Par contre la résistance aux alcalis et à l'acide fluorhydrique diminue fortement à cause de la réactivité chimique du verre face à ces produits. Le coefficient de frottement augmente, cela est parfois compensé par l'ajout de graphite.

Téflon-Carbone

Le pourcentage de carbone varie de 10 à 35 % avec souvent un faible pourcentage de graphite ajouté. Le carbone améliore considérablement la résistance à l'usure et la déformation sous contrainte. Il ne modifie pratiquement pas la résistance aux agents chimiques, par contre les propriétés électriques sont substantiellement modifiées.

Téflon-Bronze

Le pourcentage de bronze varie entre 40 et 60 % en poids. Le téflon chargé en bronze a les meilleures performances à l'usure et à la déformation sous contrainte et une bonne conductivité thermique. Par contre les performances électriques ainsi que la résistance chimique diminuent fortement

Téflon-Graphite

Le pourcentage de graphite varie entre 5 et 15 %. Il est ajouté en additif aux autres Téflons chargés pour améliorer leur coefficient de friction. Il améliore aussi, mais dans une moindre mesure, la déformation sous charge, la résistance et un peu l'usure.

Autres additifs

Sulfure de molybdène (améliore la friction), poudres métalliques (acier inox, nickel, titane), mica (améliore l'usure sans détruire les propriétés électriques), oxydes métalliques (résistance à l'usure)...

Influence du mode de fabrication du PTFE-vierge sur les performances

Le mode de fabrication du PTFE influe sur certaines de ses propriétés. Les propriétés suivantes varient peu avec le mode fabrication.

Propriétés chimiques

Résistance aux agents corrosifs et à beaucoup de solvants

Non solubilité

Tenue élevée en climat extérieur

Non-adhésivité

Non-inflammabilité

Propriétés électriques

Faible constante diélectrique

Faible facteur de dissipation

Résistance à la formation d'arc

Résistivité de surface et résistivité volumique élevées

Propriétés mécaniques

Flexibilité aux basses températures

Faible coefficient de friction

Stabilité aux températures élevées (par rapport à la plupart des polymères)

Les propriétés les plus affectées par le mode de fabrication sont : résistance à la fatigue de flexion, rigidité, résilience, résistance à l'impact, perméabilité. Certaines propriétés chimiques et électriques dépendent aussi du mode de fabrication.

En modélisme les applications sont généralement peu critiques, il ne semble pas utile d'investiguer plus dans ce domaine.

Propriétés physiques utiles à connaître

Température de service

La température de service maximale conseillée est de 260°C, ce qui correspond à 47 bars en vapeur saturante ou, plus raisonnablement, à 10 bars avec une surchauffe de 80°C. Donc très confortable pour du modélisme vapeur vive

Coefficient de frottement

Acier/téflon : 0.05 à 0.2

Acier/acier : 0.2

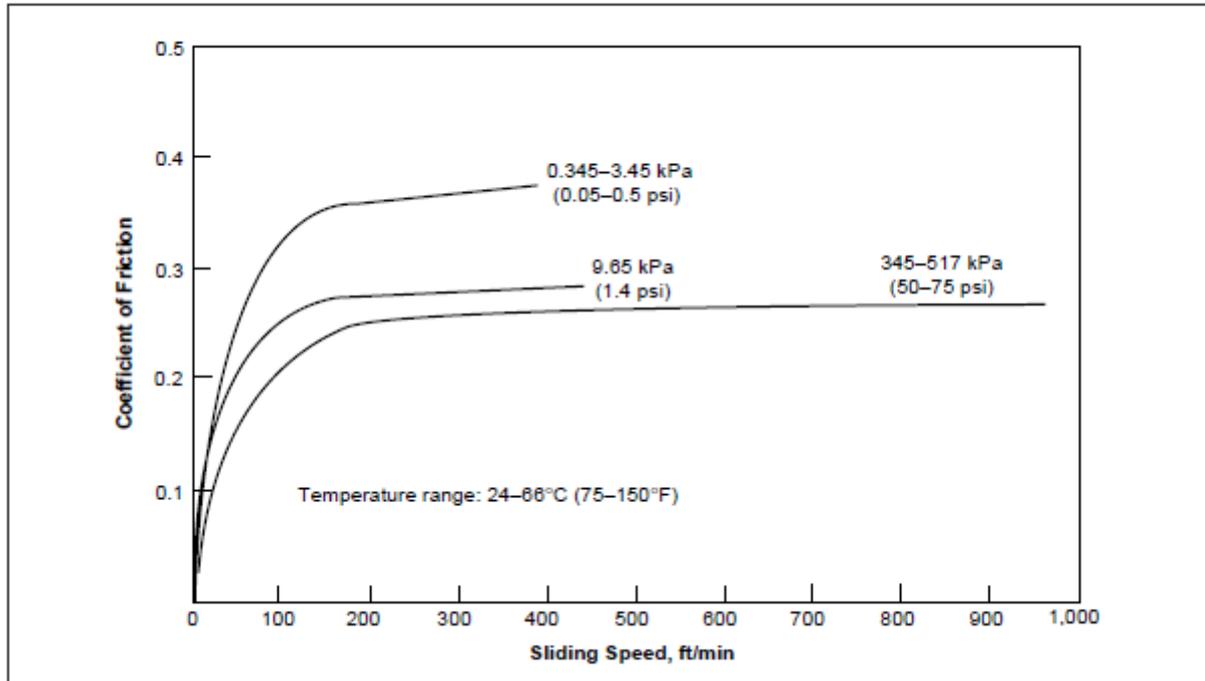
Acier/Viton : 0.5 à 0.7

Pneu/route sèche : 0.8

Le téflon se comporte très bien même aux faibles vitesses – basses charges -basses températures. Pas d'informations chiffrées disponibles sur l'évolution de ce coefficient avec la température. Le Teflon présente l'avantage de conserver de bonnes performances dans une gamme très étendue de températures.

Le Teflon conserve aussi sa propriété antifriction/antiadhésive même après une période d'immobilisation sous charge.

Figure 12. Coefficient of Friction vs. Sliding Speed



Résistance à l'abrasion

Les tests normatifs montrent une très bonne résistance à l'abrasion (émeri #320 à #400). Ces tests sont réalisés à l'ambiante. Cette résistance varie peu sur les échantillons ayant subi un « vieillissement » en température à 100, 150 et 200°C. La résistance (normative) à l'abrasion par rapport à l'ambiante augmente même (+25% par rapport à l'échantillon non chauffé) pour les échantillons ayant subi un passage de 500 heures en étuve à 150°C pour diminuer (+10% par rapport à l'échantillon non chauffé) lorsque la température d'essai passe à 200°C pendant 100 heures.

Résistance à l'usure de glissement

Cette notion est utile surtout lorsque le Téflon est utilisé sur comme matériau de paliers ou de glissières non lubrifiés.

Les calculs se basent sur des valeurs limites du couple (Pression ; Vitesse) noté PV. Le produit $P \cdot V$ varie avec la température de surface en service continu. $P \cdot V$ diminue progressivement depuis les basses températures jusqu'à devenir nul à 288°C.

Pour les températures ambiantes les valeurs avancées sont, en fonction de la vitesse de glissement :

PV and Wear Performance

Property	Teflon® PTFE
PV Limit (lb/in ² x fpm)*	
at 10 fpm	1,200
at 100 fpm	1,800
at 1,000 fpm	2,500
PV for 0.005 in radial wear in 1,000 hr** (nonlubricated)	20
Wear Factor, K (x 10 ⁻¹⁰) (in ³ ·min/ft·lb·hr)***	2,500

* Ambient temperature 21–27°C (70–80°F)

**Based on (1) unidirectional load on fixed bushing or (2) thrust washer

***At PV values below the composition's PV limit when operating unlubricated against soft carbon steels (R_c 20 to 25) finished to 12–20 μin (AA). Factor is also applicable for operation against most stainless steels and cast irons.

$1 \text{ fpm} = 0,00508 \text{ m/s}$; $1 \text{ lb/in}^2 = 6,8948 \text{ kPa}$; $1 \text{ lb/in}^2 \times \text{fpm} = 0,03502 \text{ kPa} \cdot \text{m/s}$
 $1 \text{ m/s} = 39,37 \text{ fpm}$

On établit un facteur prédictif¹ d'usure pour les conditions réelles (Pression ; Vitesse) avec la formule suivante :

$$t = KPVT$$

where t = wear, in

$$K = \text{wear factor, } \frac{\text{in}^3 \cdot \text{min}}{\text{lb} \cdot \text{ft} \cdot \text{h}}$$

$$P = \text{pressure, psi}$$

$$V = \text{velocity, fpm}$$

$$T = \text{time, h}$$

Le résultat de l'usure est en inches $1 \text{ inche} = 25,4 \text{ mm}$

Exemple : glissière Téflon après 300 h de fonctionnement

Vitesse de coulisse: 1 m/s soit 196 fpm;

Pression de la coulisse sur la glissière : 0,2 bars = 20 kPa = 2,9 lb/in²

$P \cdot V = 2,9 \cdot 196 = 568,4$ le facteur PV est dans les limites admissibles

usure de la glissière = $(2500 \cdot 10^{-10}) \cdot 2,9 \cdot 196 \cdot 300 = 0,043 \text{ in} = 1,08 \text{ mm}$

On voit que le Téflon s'use cependant assez vite. Il est en général réservé aux mouvements lents ainsi qu'aux environnements extrêmes (température très basse, environnement chimique agressif, interdiction de lubrification, ...).

Pour ces applications soumises à l'usure on se tournera éventuellement vers les Téflon chargés. On dispose aussi aujourd'hui d'autres polymères techniques spécifiquement conçus pour ces applications. Beaucoup sont basés sur le concept des anciens joints métalliques frittés auto-lubrifiants. Les microporosités du matériau relâchent sous charge le fluide de lubrification et le réabsorbent ensuite quand la charge disparaît.

¹ Ces formules sont plus indicatives que vraiment prédictives

Coefficient de dilatation en fonction de la température

- D'une manière générale on retiendra que la dilatation du Téflon, et des polymères en général est 10 fois plus importante que celle d'un métal.
- Il faut noter qu'entre 15°C et 35°C le Téflon subit une réorganisation cristalline qui fait augmenter son volume. Les mesures de contrôle métrologique doivent en tenir compte.

**Teflon® PTFE Resins
Linear Coefficients of Expansion**

Temperature Range, °C (°F)	Linear Coefficient of Expansion, 10 ⁻⁵ mm/mm.°C (10 ⁻⁵ in/in.°F)	
25 to -190 (77 to -310)	8.6	4.8
25 to -150 (77 to -238)	9.6	5.3
25 to -100 (77 to -148)	11.2	6.2
25 to -50 (77 to -58)	13.5	7.5
25 to 0 (77 to 32)	20	11.1
10 to 20 (50 to 68)	16	8.9
20 to 25 (68 to 77)	79	43.9
25 to 30 (77 to 86)	16	8.9
25 to 50 (77 to 122)	12.4	6.9
25 to 100 (77 to 212)	12.4	6.9
25 to 150 (77 to 302)	13.5	7.5
25 to 200 (77 to 392)	15.1	8.4
25 to 250 (77 to 482)	17.5	9.7
25 to 300 (77 to 572)	22	12.1

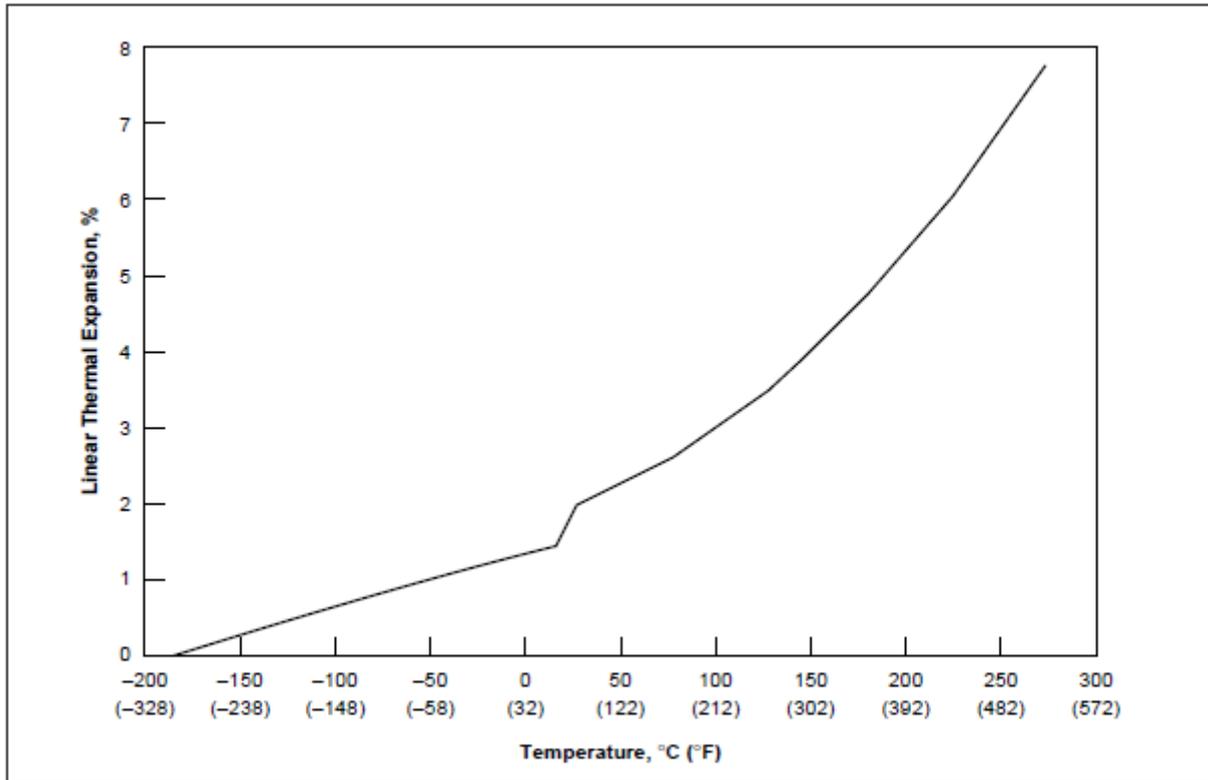
**Teflon® PTFE Resins
Cubical Coefficients of Expansion**

Temperature Range, °C (°F)	cm ³ /cm ³ .°C	in ³ /in ³ .°F
-40 to 15(-40 to 59)	2.6 x 10 ⁻⁴	1.5 x 10 ⁻⁴
15 to 35 (59* to 95)	1.7%	
35 to 140 (95 to 284)	3.1 x 10 ⁻⁴	1.7 x 10 ⁻⁴
140 to 200 (284 to 392)	6.3 x 10 ⁻⁴	3.5 x 10 ⁻⁴
200 to 250 (392 to 482)	8.0 x 10 ⁻⁴	4.4 x 10 ⁻⁴
250 to 300 (482 to 572)	1.0 x 10 ⁻³	5.7 x 10 ⁻⁴

*Quinn et al., *J. Applied Phys.* 22, 1085 (1951)

La figure ci-dessous illustre le pourcentage d'allongement d'une barre en fonction de la température. On visualise bien la zone de transition entre 15 et 35°C

Figure 11. Linear Thermal Expansion vs. Temperature



Conductivité thermique

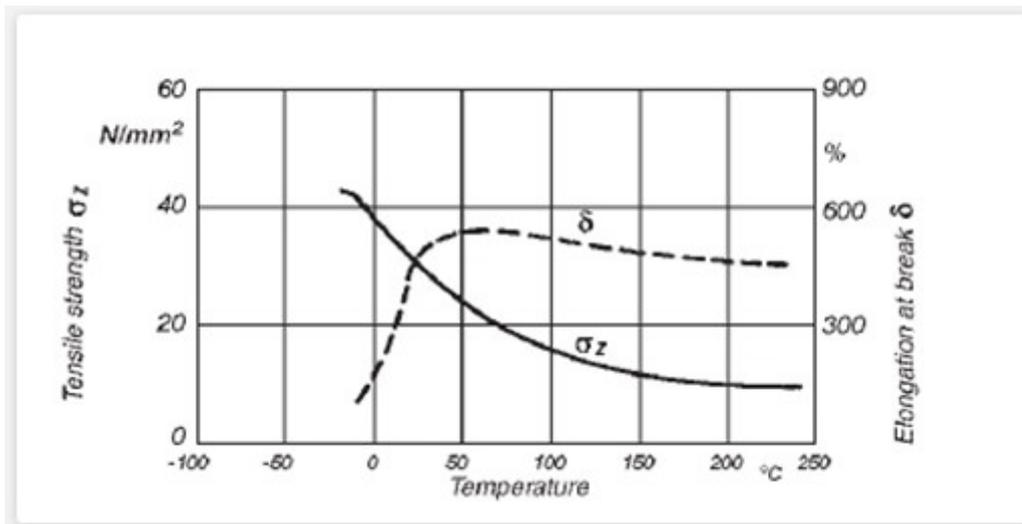
Conductivité thermique (λ) : $0,23-0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Par comparaison Cuivre 390, Aluminium 237, Laiton 110-125, Acier-Fonte 45-50

Le Téflon conduit mal la chaleur. Ceci implique un soin particulier lors des usinages car la chaleur peut très vite atteindre la valeur de décomposition du Téflon.

Variation des caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques varient beaucoup en diminuant avec la température comme illustré sur le diagramme ci-dessous. On ne concevra une pièce que dans le cadre de sa température de service.



Usinage et formage

Le Teflon s'usine sur des machines classiques, conventionnelles ou à commande numérique. Les points à prendre en compte :

- déformation importante sous effort : dispositif d'ablocage et de reprise des pressions d'usinage à étudier soigneusement
- matériau tendre mais élastique : la pression de l'outil doit être contrôlée sous peine de cotes finales inconsistantes
- sensation de tournage proche du laiton mais usure des outils comparable à celle des inox usinables
- la faible conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique : la chaleur est difficilement évacuée. Prévoir un refroidissement, en général on préconise l'air comprimé, mais les liquides de refroidissement sont tout à fait utilisables. Les outils doivent être parfaitement tranchants et polis. On préfère les nuances HSS car la pression de coupe est plus faible.

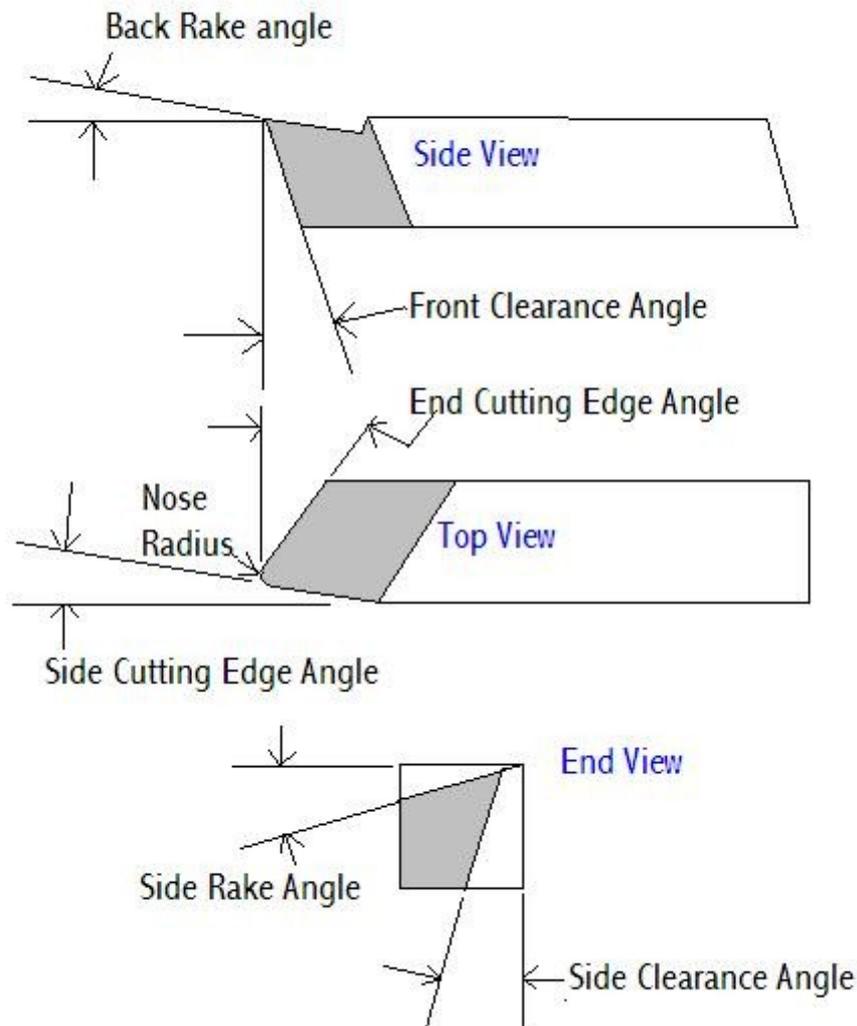
Les angles² conseillés sont :

Top rake	0–15° positive
Side rake and side angle	0–15°
Front or end rake	0.5–10°

Les valeurs supérieures sont à choisir pour les barres d'alésage.

2 Voir tableau en Annexe pour la définition des angles d'autres polymères.

Tool Bit Geometry



Le Teflon produit de très longs copeaux continus qui doivent être conduits et évacués hors de la zone de coupe. Il faut être particulièrement vigilant lors des perçages et des taraudages sur machines automatiques.

Recuit de dé-tensionnement-Précautions de mesures

Pour les pièces précises on effectue préalablement, en étuve sèche, un recuit de dé-tensionnement à une température un peu supérieure à la température de service, sans dépasser 290-300°C. La température est maintenue une heure par 2,5cm d'épaisseur du matériau suivi d'un refroidissement lent. Ensuite on usine jusqu'à 0,3-0,8mm de la cote finie. On effectue un nouveau recuit, puis avec un outillage parfaitement affûté et réglé on réalise la ou les passes de finition.

Le contrôle dimensionnel des pièces nécessite du savoir faire. Par exemple avec un micromètre un contrôleur inexpérimenté peut lire des cotes 0,15 à 0,25mm en dessous de la cote réelle. Ceci est dû

au faible module d'Young du matériau qui se déforme facilement sous charge. Dans l'industrie on utilise des comparateurs optiques et les pièces critiques sont mesurées à la température de service.

Compte tenu de la zone de transition cristalline entre 15 et 35°C avec gonflement du matériau il existe des protocoles de mesure à suivre. On travaille en zone de température stable à 22°C, la pièce à mesurer stabilisée à la température. On mesure après un temps de relaxation naturel des contraintes. Après mesure on effectue des calculs de compensation dimensionnelle par rapport à la température de service.

En modélisme, pour des pièces comme des bagues ou coupelles d'étanchéité d'un ensemble piston-cylindre qui travaille en vapeur entre 120°C et 200°C il y a lieu de tenir compte du phénomène de dilatation ainsi que de la mesure des pièces finies effectuées à froid.

Tolérances usuelles des pièces en PTFE (source ASTM)

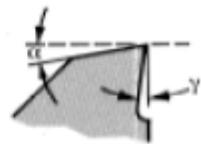
Pièces moulées

Molded Part	
Rings:	
Diameter	0.010 mm/mm
Wall	0.10 mm
Height (maximum)	0.100 mm/mm (min 0.38 mm)
Concentricity (OD to ID)	0.008
Parallelism wall-greater than 2.54 mm (0.100 in.)	0.010 mm/mm diameter
Solid Round:	
Diameter	0.010 mm/mm
Height	0.100 mm/mm min 0.38 mm, min 0.254 mm
Parallelism	0.20 mm/mm of diameter
Solid other than round:	
Lengths	0.01 mm/mm
Height (mold direction)	0.100 mm/mm min 0.38 mm, min 0.254 mm
Parallelism	0.20 mm/mm of length
General:	
Corners	0.25 mm min radius
Finish	3.25 μ m min
Steps:	
Draft angle	4° max
Radius or fillet, or both	0.25 mm min radius

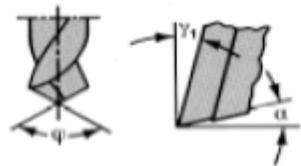
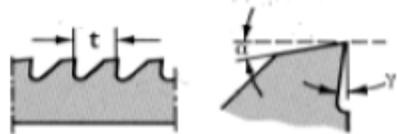
Pièces usinées

TABLE 2 Tolerances for Machined Parts of PTFE Resins

Machining Operation	
Turning/boring:	
All dimensions (OD, ID, and lengths) up to 25.4 mm (1 in.)	±38 µm
For each additional inch of dimension (OD, ID and length) add a further tolerance of	±25 µm
ID tolerance based on a length to diameter ratio no greater than	...
Concentricity—Total indicator reading (TIR) for relation of OD to ID angles	±150 µm
	±8.7 rad
Drilling/reaming:	
Reaming of PTFE parts is not generally recommended due to build-up of frictional heat in tool.	
Diameter of drilled hole tolerance based on a length to a diameter ratio not to exceed 5.0 to 1.0.	
Location and depth of drilled hole	±38 µm
Milling:	
All dimensions	±0.005 mm/mr
Angles	±8.7 rad
Sawing:	
All dimensions	±1.524 mm
Grinding:	
Face or flat grinding is usually not performed on PTFE parts, but where this process is required tolerances are to be agreed upon between the purchaser and the seller.	
Centerless grinding:	
Dimensions up to ¼ in.	±12.7 µm
Dimensions from ½ in. to 1 in.	±25.4 µm
For each additional inch or part of inch add a further tolerance of	±12.7 µm
Finish:	
When specifying surface finish on machined PTFE parts, the method of measurement must also be specified. Even when surface measurement instruments are properly used, root mean square (rms), surface finish reading will range ±50 % and tolerances should be specified.	
When performance is a function of finish, inspection techniques should be agreed upon between the purchaser and the seller. It should be pointed out that, since a polymer that undergoes plastic flow and material transfer is being considered, the surface finish, itself, is not as critical as it is for metals.	

Machining Operations		Turning					Milling		
		 <p> α Clearance angle ($^{\circ}$) γ Rake angle ($^{\circ}$) χ Side angle ($^{\circ}$) V Cutting speed ft/min S Feed mils/rev </p> <p>The nose radius r must be at least 0.020in. For SINTIMID,[™] r should be 0.005 to 0.010 in.</p>					 <p> α Clearance angle ($^{\circ}$) γ Rake angle ($^{\circ}$) V Cutting speed ft/min </p> <p>The feed can amount to up to 0.020 in./tooth. For SINTIMID,[™] use a feed of 0.010 in. for rough cutting and 0.002 in. for finishing.</p>		
Trade Name	Raw Material Group	α	γ	χ	V	S	α	γ	V
TECANAT [™]	Polycarbonate	5-10	6-8	45-60	950	4-20	10-20	5-15	950
TECARAN [™]	ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)	5-15	25-30	15	650-1600	8-20	5-10	0-10	950-1600
TECAST VEKTON [™]	Cast Nylon 6	6-10	0-5	45-60	800-1600	4-20	10-20	5-15	800-1600
TECASON S [™]	Polysulfone	6	0	45-60	1150-1300	4-12	2-10	1-5	800-1600
TECAFLON [™]	PVDF (Polyvinylidene Fluoride)	10	5-8	10	500-1600	4-12	5-15	5-15	800-1600
TECAMID [®]	Nylon 6/6	6-10	0-5	45-60	800-1600	4-20	10-20	5-15	800-1600
TECAFORM [™]	Acetal	6-8	0-5	45-60	950-1950	4-16	5-15	5-15	800-1600
TECAPET [™]	PET (Polyethylene Terephthalate)	5-10	0-5	45-60	950-1300	8-16	5-15	5-15	950
DELRIN [®]	Acetal Homopolymer	6-8	0-5	45-60	950-1950	4-16	5-15	5-15	800-1600
NORYL [®]	PPO (Polyphenylene Oxide)	5-10	6-8	45-60	950	4-20	10-20	5-15	950
TECAPEEK [™]	Polyetheretherketone	6-12	5	45-60	950	15	5-15	5-15	550-750
ULTEM [®]	Polyetherimide	15	5	5	1000-2000	5-20	15	5	650-1300
SINTIMID [™]	Polyimide	0-5	8-10	60-75	300-600	1-20	5-20	5-15	300-800
Reinforced Engineering Plastics*		6-8	2-8	45-60	500-650	4-20	15-30	6-10	250-350

* Reinforcing materials: glass fibers, glass beads, carbon fibers

Machining Operations	Drilling and Boring	Sawing
	 <p> α Clearance angle (°) γ_1 Rake angle (°) ϕ Point angle (°) V Cutting speed ft/min S Feed mils/rev </p> <p>The angle of twist β of the drill bit should be approximately 12 to 16°.</p>	 <p> α Clearance angle (°) γ Rake angle (°) V Cutting speed ft/min t Pitch mils </p> <p>For SINTIMID™ use a carbide-grit-edge band saw with a continuous edge to prevent chipping.</p>

Trade Name	Raw Material Group	α	γ_1	ϕ	V	S	α	γ	V	t
TECANAT™	Polycarbonate	8-10	10-20	90	150-300	8-12	15-30	5-8	950	115-310
TECARAN™	ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)	8-12	10-30	90	150-650	8-12	15-30	0-5	950	75-310
TECAST VEKTON™	Cast Nylon 6	5-15	0-20	90-120	150-500	4-12	20-30	2-5	1600	115-310
TECASON S™	Polysulfone	3-10	10-20	90	50-250	4-12	15-30	0-4	1600	75-195
TECAFLON™	PVDF (Polyvinylidene Fluoride)	10-16	5-20	130	500-650	4-12	20-30	5-8	950	75-195
TECAMID®	Nylon 6/6	5-15	10-20	90	150-500	4-12	20-30	2-5	1600	115-310
TECAFORM™	Acetal	5-10	15-30	90	150-650	4-12	20-30	0-5	1600-2600	75-195
TECAPET™	PET (Polyethylene Terephthalate)	5-10	10-20	90	150-300	8-12	15-30	5-8	950	115-310
DELRIN®	Acetal Homopolymer	5-10	15-30	90	150-650	4-12	20-30	0-5	1600-2600	75-195
NORYL®	PPO (Polyphenylene Oxide)	8-10	10-20	90	150-300	8-12	15-30	5-8	950	115-310
TECAPEEK™	Polyetheretherketone	12	10-20	118	400	2-8	15-30	10-15	600-950	115-195
ULTEM®	Polyetherimide	5-10	5-20	70-90	300	5-15	15-30	5-10	3000-5000	100
SINTIMID™	Polyimide	5-15	5-20	90-120	500-600	3-5	15-30	0-5	3000-7000	80-130
Reingforced Engineering Plastics*		6	5-10	120	250-300	4-12	15-30	10-15	600-950	115-195