

Procédés de fabrication I - IGI - HEIG-VD

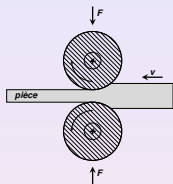
Formage des Matériaux

Résumé

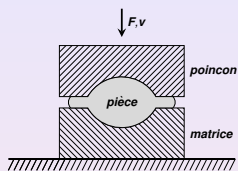
22 décembre 2023

Formage des métaux

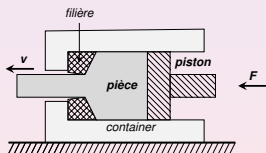
Classification des techniques de formage des pièces massives



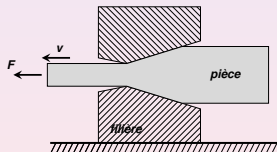
laminage



forgeage (matriçage)



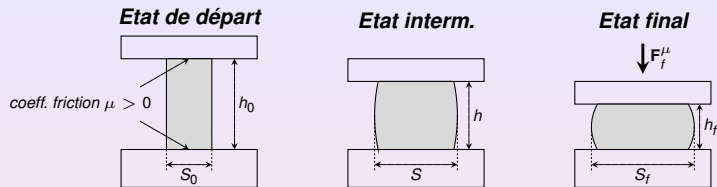
extrusion



tréfilage

Forgeage

Aspect dynamique en forgeage libre



- l'état de contrainte est majoritairement un état de **compression uniaxiale**. Le frottement sur le poinçon et la matrice induit une correction en **cisaillement** que la théorie des lignes de glissement permet d'évaluer.

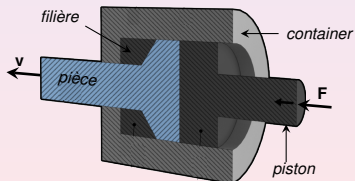
Force avec effet de tonnelage / Force à friction nulle

- $F_f^0 = S_f \sigma(\varepsilon)$ avec $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f}$.
 $\sigma(\varepsilon) = R_e$ (métaux plast. idéaux) ou $\sigma(\varepsilon) = K\varepsilon^n$ (Ludwik) etc...
- $F_f^\mu = \left(1 + C\mu \frac{\sqrt{S_f}}{h_f}\right) F_f^0$ avec $C = C(\text{géom., mat. } \dots) > 0$.
 $C \simeq 0.45$ pour une section circulaire.

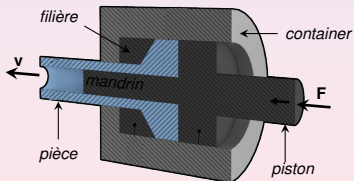
Extrusion

Principe de l'extrusion

- *L'extrusion est un procédé dans lequel on produit une barre de section souhaitée en poussant le métal au travers d'une filière.*
- *La présence de contraintes de compression dans la direction d'extrusion est évidente. Elles se combinent à d'autres contraintes de compression exercées par la filière.*
- *L'extrusion peut se faire à chaud ou à froid. Généralement, les propriétés structurales et mécaniques obtenues en extrusion à froid sont meilleures.*
- *Un des avantages du procédé d'extrusion est l'économie de matière : peu ou pas de matière perdue.*



Extrusion simple



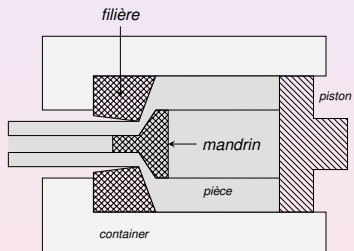
Extrusion avec mandrin

Source : Manufacturing guide

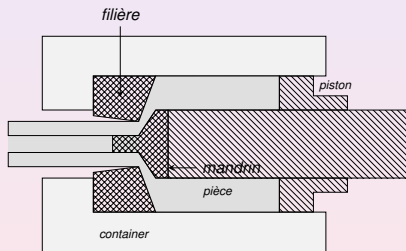
Extrusion de profilés tubulaires

Utilisation de mandrins

- Des profilés tubulaires peuvent être extrudés au travers d'une filière qui donne la forme extérieure et d'un autre outil appelé mandrin et qui donne la forme intérieure.
- On distingue les solutions avec mandrin flottant qu'on installe dans un lopin tubulaire et celles avec mandrin fixe. Le mandrin fixe est généralement utilisé pour percer le lopin.



Mandrin flottant

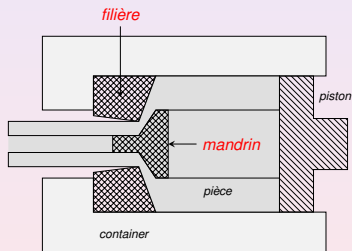


Mandrin fixe

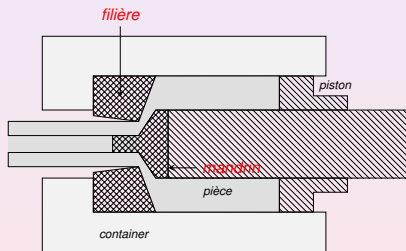
Extrusion de profilés tubulaires

Utilisation de mandrins

- Des profilés tubulaires peuvent être extrudés au travers d'une filière qui donne la forme extérieure et d'un autre outil appelé mandrin et qui donne la forme intérieure.
- On distingue les solutions avec mandrin flottant qu'on installe dans un lopin tubulaire et celles avec mandrin fixe. Le mandrin fixe est généralement utilisé pour percer le lopin.



Mandrin flottant

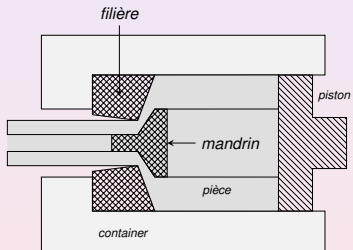


Mandrin fixe

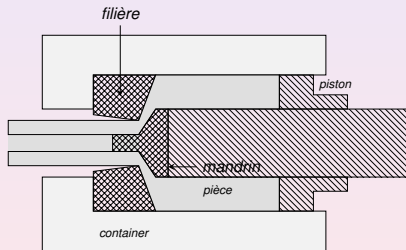
Extrusion de profilés tubulaires

Utilisation de mandrins

- Des profilés tubulaires peuvent être extrudés au travers d'une filière qui donne la forme extérieure et d'un autre outil appelé mandrin et qui donne la forme intérieure.
- On distingue les solutions avec mandrin flottant qu'on installe dans un lopin tubulaire et celles avec mandrin fixe. Le mandrin fixe est généralement utilisé pour percer le lopin.



Mandrin flottant

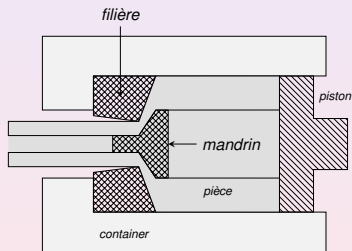


Mandrin fixe

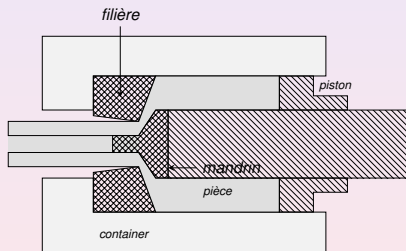
Extrusion de profilés tubulaires

Utilisation de mandrins

- Des profilés tubulaires peuvent être extrudés au travers d'une filière qui donne la forme extérieure et d'un autre outil appelé mandrin et qui donne la forme intérieure.
- On distingue les solutions avec mandrin flottant qu'on installe dans un lopin tubulaire et celles avec mandrin fixe. Le mandrin fixe est généralement utilisé pour percer le lopin.



Mandrin flottant



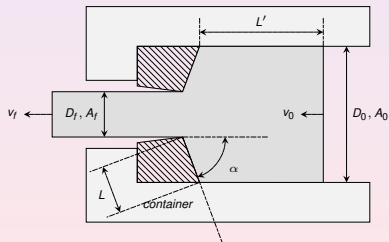
Mandrin fixe

Extrusion - Nomenclature

Schéma et nomenclature pour l'extrusion

Nom	Unité
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

Nom	Unité
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L, L' : longueurs de contact	mm
α : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



• Relations géométriques

$$\cdot L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$$

• Relations physiques

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

(incompressibilité)

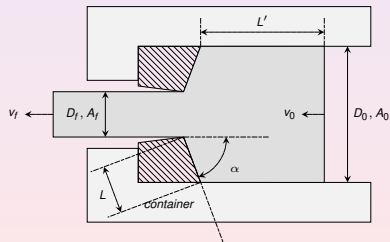
• Rapport d'extrusion

$$\cdot r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$$

Schéma et nomenclature pour l'extrusion

Nom	Unité
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

Nom	Unité
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L, L' : longueurs de contact	mm
α : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



• Relations géométriques

$$\cdot L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$$

• Relations physiques

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

(incompressibilité)

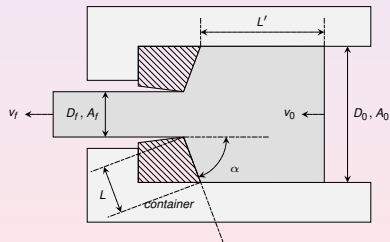
• Rapport d'extrusion

$$\cdot r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$$

Schéma et nomenclature pour l'extrusion

Nom	Unité
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

Nom	Unité
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L, L' : longueurs de contact	mm
α : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



• Relations géométriques

$$\cdot L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$$

• Relations physiques

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

(incompressibilité)

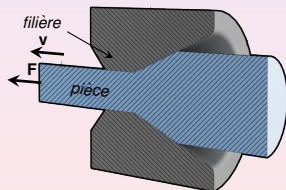
• Rapport d'extrusion

$$\cdot r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$$

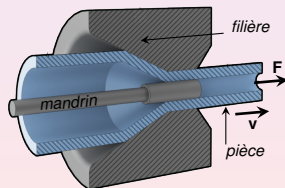
Tréfilage

Principe du tréfilage

- Le tréfilage est un procédé dans lequel on modifie la section d'une barre métallique. La différence avec l'extrusion est que la matière est tirée (et non pas poussée) au travers de la filière. Celle-ci est abondamment lubrifiée.
- Le tréfilage peut se faire à chaud (au détriment des propriétés de la pièce).
- Une contrainte de traction se développe dans la direction de tréfilage (risque de **striction**) et se combine à une contrainte de compression exercée par la filière.
- En général, l'écroutissage obtenu après tréfilage est extrêmement important. Pour améliorer les propriétés plastiques des pièces tréfilées, des traitements thermiques sont généralement nécessaires (**patentage**) .



Tréfilage simple



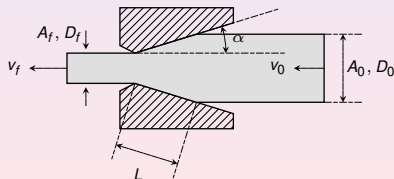
Tréfilage avec mandrin

Tréfilage - Nomenclature

Schéma et nomenclature pour le tréfilage

<i>Nom</i>	<i>Unité</i>
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

<i>Nom</i>	<i>Unité</i>
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L : longueur de contact	mm
α : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

- $L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$

- **Relations physiques**

- $v_f A_f = v_0 A_0$
(incompressibilité)

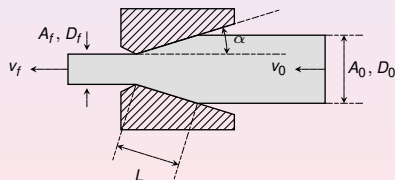
- **Rapport de tréfilage**

- $r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$

Schéma et nomenclature pour le tréfilage

Nom	Unité
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

Nom	Unité
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L : longueur de contact	mm
α : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

- $L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$

- **Relations physiques**

- $v_f A_f = v_0 A_0$
(incompressibilité)

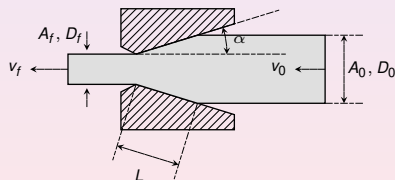
- **Rapport de tréfilage**

- $r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$

Schéma et nomenclature pour le tréfilage

Nom	Unité
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

Nom	Unité
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L : longueur de contact	mm
α : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

- $L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$

- **Relations physiques**

- $v_f A_f = v_0 A_0$
(incompressibilité)

- **Rapport de tréfilage**

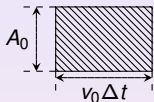
- $r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$

Extrusion et tréfilage

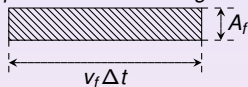
Travail spécifique d'extrusion/tréfilage (matériau plastiquement idéal)

- Les opérations d'extrusion et de tréfilage consistent (essent.) en un étirage.

avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



- Le taux de déformation vaut $\varepsilon = \ln \frac{v_f \Delta t}{v_0 \Delta t} = \ln \frac{v_f}{v_0} = \ln \frac{A_0}{A_f}$.
- Le travail spécifique de **déformation** en extrusion/tréfilage est l'aire sur la courbe de traction réelle :

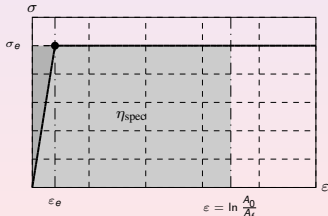


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon$$

- Si ε_e est **très petit** alors $\sigma_e \simeq R_e$ et :

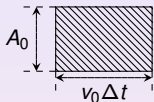
$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon = R_e \ln \frac{A_0}{A_f} = -R_e \ln r \quad (1)$$

Extrusion et tréfilage

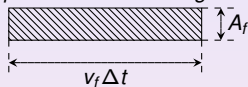
Travail spécifique d'extrusion/tréfilage (matériau plastiquement idéal)

- Les opérations d'extrusion et de tréfilage consistent (essent.) **en un étirage**.

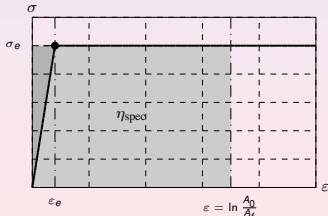
avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



- Le taux de déformation vaut $\varepsilon = \ln \frac{v_f \Delta t}{v_0 \Delta t} = \ln \frac{v_f}{v_0} = \ln \frac{A_0}{A_f}$.
- Le travail spécifique de **déformation** en extrusion/tréfilage est l'aire sur la courbe de traction réelle :



- Pour un corps **plastiquement idéal** :

$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

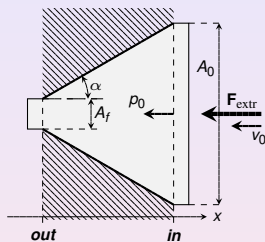
- Si ε_e est **très petit** alors $\sigma_e \simeq R_e$ et :

$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon = R_e \ln \frac{A_0}{A_f} = -R_e \ln r \quad (1)$$

Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

Pression et force d'extrusion

Situation sans frottement



- On appelle p_0 la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée. Cette quantité est à peu-près constante sur la section A_0 . La force d'extrusion est donc $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$. La puissance d'extrusion vaut

$$P_{\text{extr}} = p_0 A_0 v_0. \quad (2)$$

Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} A_0 v_0 \quad (3)$$

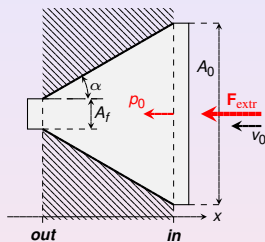
avec η_{spec} le travail spécifique de déformation (1) et $A_0 v_0$ le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent $p_0 = \eta_{\text{spec}}$ soit avec $r = \frac{A_f}{A_0}$, le rapport d'extrusion :

$$p_0 = -R_e \ln r \quad (\text{Pression d'extrusion}) \quad (4)$$

$$F_{\text{extr}} = -A_0 R_e \ln r \quad (\text{Force d'extrusion}) \quad (5)$$

Pression et force d'extrusion

Situation sans frottement



- On appelle p_0 la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée. Cette quantité est à peu-près constante sur la section A_0 . La force d'extrusion est donc $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$. La puissance d'extrusion vaut

$$P_{\text{extr}} = p_0 A_0 v_0. \quad (2)$$

Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} A_0 v_0 \quad (3)$$

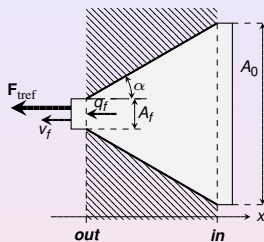
avec η_{spec} le travail spécifique de déformation (1) et $A_0 v_0$ le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent $p_0 = \eta_{\text{spec}}$ soit avec $r = \frac{A_f}{A_0}$, le rapport d'extrusion :

$$p_0 = -R_e \ln r \quad (\text{Pression d'extrusion}) \quad (4)$$

$$F_{\text{extr}} = -A_0 R_e \ln r \quad (\text{Force d'extrusion}) \quad (5)$$

Traction et force de tréfilage

Situation sans frottement



- On appelle q_f la traction de tréfilage appliquée au flan en sortie. Cette quantité est à peu-près constante sur la section A_f . La force de tréfilage est donc $F_{\text{tref}} = q_f A_f$. La puissance de tréfilage vaut

$$P_{\text{tref}} = q_f A_f v_f. \quad (6)$$

Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} A_f v_f \quad (7)$$

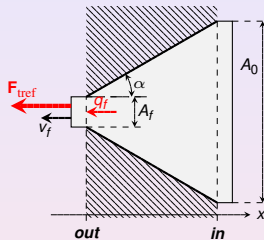
avec η_{spec} le travail spécifique de déformation (1) et $A_f v_f$ le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent $q_f = \eta_{\text{spec}}$ soit avec $r = \frac{A_f}{A_0}$, le rapport de tréfilage :

$$q_f = -R_e \ln r \quad (\text{Traction de tréfilage}) \quad (8)$$

$$F_{\text{tref}} = -A_f R_e \ln r \quad (\text{Force de tréfilage}) \quad (9)$$

Traction et force de tréfilage

Situation sans frottement



- On appelle q_f la traction de tréfilage appliquée au flan en sortie. Cette quantité est à peu-près constante sur la section A_f . La force de tréfilage est donc $F_{\text{tref}} = q_f A_f$. La puissance de tréfilage vaut

$$P_{\text{tref}} = q_f A_f v_f. \quad (6)$$

Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} A_f v_f \quad (7)$$

avec η_{spec} le travail spécifique de déformation (1) et $A_f v_f$ le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent $q_f = \eta_{\text{spec}}$ soit avec $r = \frac{A_f}{A_0}$, le rapport de tréfilage :

$$q_f = -R_e \ln r \quad (\text{Traction de tréfilage}) \quad (8)$$

$$F_{\text{tref}} = -A_f R_e \ln r \quad (\text{Force de tréfilage}) \quad (9)$$

Contraintes d'extrusion/tréfilage

Prise en compte des frottements

- Si des *frottements de nature coulombienne* (coefficient de frottement μ) entre le lopin et la filière doivent être pris en compte alors la formule (4) pour la pression d'extrusion doit être modifiée en conséquence :

$$p_0 = \begin{cases} R_e \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left(\frac{1 - r^{\mu \cot \alpha}}{r^{\mu \cot \alpha}} \right), & \text{si } \mu \geq 0 \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad \text{(Press. d'extrusion)} \quad (10)$$

- Il en va de même de la traction de tréfilage (8) :

$$q_f = \begin{cases} R_e \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) (1 - r^{\mu \cot \alpha}), & \text{si } \mu \geq 0 \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad \text{(Tract. de tréfilage)} \quad (11)$$

Contraintes d'extrusion/tréfilage

Prise en compte des frottements

- Si des frottements de nature coulombienne (coefficient de frottement μ) entre le lopin et la filière doivent être pris en compte alors la formule (4) pour la pression d'extrusion doit être modifiée en conséquence :

$$p_0 = \begin{cases} R_e \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left(\frac{1 - r^{\mu \cot \alpha}}{r^{\mu \cot \alpha}} \right), & \text{si } \mu \geq 0 \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad \text{(Press. d'extrusion)} \quad (10)$$

- Il en va de même de la traction de tréfilage (8) :

$$q_f = \begin{cases} R_e \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) (1 - r^{\mu \cot \alpha}), & \text{si } \mu \geq 0 \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad \text{(Tract. de tréfilage)} \quad (11)$$