

Vers la modélisation d'une presse à vis : développement d'un modèle statique élastique

C. DURAND^a, J-F. MULL^a, C. BAUDOUIN^a, R. BIGOT^a

a. Université de Lorraine, Arts et Métiers ParisTech, LCFC, F-57000 Metz, France,
camille.durand@ensam.eu

Résumé :

L'utilisation croissante de superalliages dans l'industrie de la forge induit le développement de nouvelles gammes de fabrication. Ces gammes sont mises au point à l'aide de la simulation numérique par Eléments Finis. Or, pour ce qui concerne la prédiction de l'énergie nécessaire à la mise en forme d'une pièce de superalliage, des différences significatives sont observées entre les prédictions obtenues par simulations et les résultats de l'expérimentation. Selon nous, ces différences s'expliquent principalement par le fait que les modèles des machines de forge implémentés dans les logiciels Eléments Finis ne sont pas assez détaillés. Ainsi, cette étude s'intéresse plus particulièrement au cas de la modélisation d'une machine de forge limitée en énergie : une presse à vis. Ces travaux constituent une première étape vers une modélisation complète et détaillée de la presse à vis. Pour commencer, un modèle statique élastique des montants de la presse a été développé, et ce modèle a été validé par comparaison avec un modèle Eléments Finis des montants. Puis le modèle Eléments Finis a été complexifié par l'ajout de la traverse supérieure de la presse. Ce modèle a été validé grâce à des essais réalisés à l'aide d'un système de suivi de points dans l'espace, nous permettant de capter le comportement de la presse lors des frappes.

Abstract :

The increasing use of superalloys in the forging industry induces the development of new manufacturing processes. These new processes are set up thanks to Finite Element simulation. But regarding the prediction of the energy required to form a part in superalloys, significant differences are observed between numerical and experimental results. In our vision, this can be explained by the fact that forging machines models implemented in Finite Element software are not enough detailed. Thus, this study focuses on the particular case of a forging machine limited in energy: a screw press. This work is a first step toward a complete and detailed modelling of the screw press. To begin, a purely static elastic model of the press uprights has been developed, and this model was validated by comparison with a Finite Element model of the uprights. Then, this Finite Elements model has been made more complex by adding the cross-head of the press. This model has been validated thanks to experiences carried out with the help of a 3D tracking points system, allowing us to analyze the press behavior during blows.

Mots clefs : presse à vis, modèle, raideur, simulation Eléments Finis, élastique, statique.

1 Introduction

De nos jours, les procédés de forgeage sont bien souvent mis au point à l'aide de la simulation numérique qui permet d'optimiser les gammes de forgeage. Cependant, dans le cas de matériaux hautes performances, des différences significatives entre la réalité et les prédictions de simulations ont été observées. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que la grande résistance à se déformer du matériau, crée un choc élastique lorsqu'il entre en contact avec l'outil [1]. Ainsi, une part importante de l'énergie de frappe est retournée à la machine sous forme d'énergie élastique et doit être prise en compte pour améliorer les prédictions de simulations.

Une première approche permet de quantifier cette perte d'énergie en modélisant la presse comme un ressort équivalent [2]. La raideur équivalente peut être définie dans trois directions, axialement et en rotation, et ainsi on peut calculer la perte d'énergie en déformation élastique de la machine. Une autre méthode consiste à introduire une matrice de flexibilité, dont les coefficients expriment la déformation axiale et en rotation. Cette matrice peut être complétée par un vecteur « jeux » pour considérer la non-linéarité de la force due aux jeux de guidages. Ce modèle a été fréquemment utilisé notamment pour des presses hydrauliques, à excentriques ou à vis [3-5]. L'identification expérimentale des raideurs de presse est difficile car il faut être capable de solliciter une presse uniquement selon une direction privilégiée. Actuellement, deux méthodes existent pour ce faire : soit on utilise la machine selon son mode de fonctionnement normal et le chargement est généré par la frappe [6,7] soit on fait appel à des appareils extérieurs, comme des vérins hydrauliques placés sur la table de la presse et qui génèrent un chargement sur le coulisseau [8].

Pour s'affranchir de ces problèmes de dispositif expérimental, certaines études n'utilisent que des simulations Eléments Finis (EF) [9]. Les déformations, qu'elles soient obtenues expérimentalement ou numériquement, permettent le calcul de la raideur de presse. Par ailleurs, plusieurs auteurs proposent de prédire la raideur de presse équivalente en modélisant la presse comme une succession de ressorts [5,10]. Chaque ressort représente un élément de la presse avec sa raideur propre. La raideur équivalente de la presse est exprimée en fonction de la raideur de chacun des éléments et du type de liaison défini entre les éléments : série ou parallèle. Cette méthode considère un nombre limité d'éléments de la presse et ne donne pas de méthode pour obtenir la raideur d'un élément de la presse.

Cette étude propose un modèle statique élastique d'une presse à vis. Ce modèle est fondé sur le comportement élastique des matériaux et une approximation des géométries de la presse. La raideur des montants du bâti de la presse est déterminée grâce à ce modèle statique élastique ainsi que par une analyse en EF réalisée avec une structure simplifiée de la presse. Puis la structure de la presse est complexifiée dans l'analyse EF pour être modélisée telle un portique. La modélisation en portique est validée par comparaison avec les résultats de raideur obtenus expérimentalement grâce à un système de suivi de points dans l'espace.

2 La presse à vis

La presse à vis de notre étude est la presse à vis Lasco SPR 400 de la plateforme VULCAIN située au centre Arts et Métiers de Metz (Figure 1.a). Cette presse à vis est constituée d'un bâti multi-composants de type portique. La zone de frappe est encadrée par 4 montants incluant des tirants précontraints en acier forgé et 2 traverses en fonte moulée. Le coulisseau est constitué de l'écrou, et la

vis est liée au bâti par une liaison pivot. Un moteur électrique à commande directe alimente le volant d'inertie qui génère le mouvement de rotation, transmis au coulisseau sous forme de mouvement de translation vertical et donc d'énergie de forgeage. La remontée du coulisseau se fait en inversant le sens de rotation de la vis et donc du volant d'inertie. La presse est instrumentée : les efforts sont mesurés grâce à un pont de jauge de déformation situé sur la traverse supérieure de la presse et le déplacement du coulisseau est mesuré grâce à un codeur magnétique incrémental.

3 Validation du modèle statique élastique

3.1 Modèle statique élastique des montants

La géométrie des éléments de la presse est approximée en utilisant des formes standards définies dans le Tableau 1. Le schéma de la géométrie simplifiée de la machine correspond à la Figure 1.b.

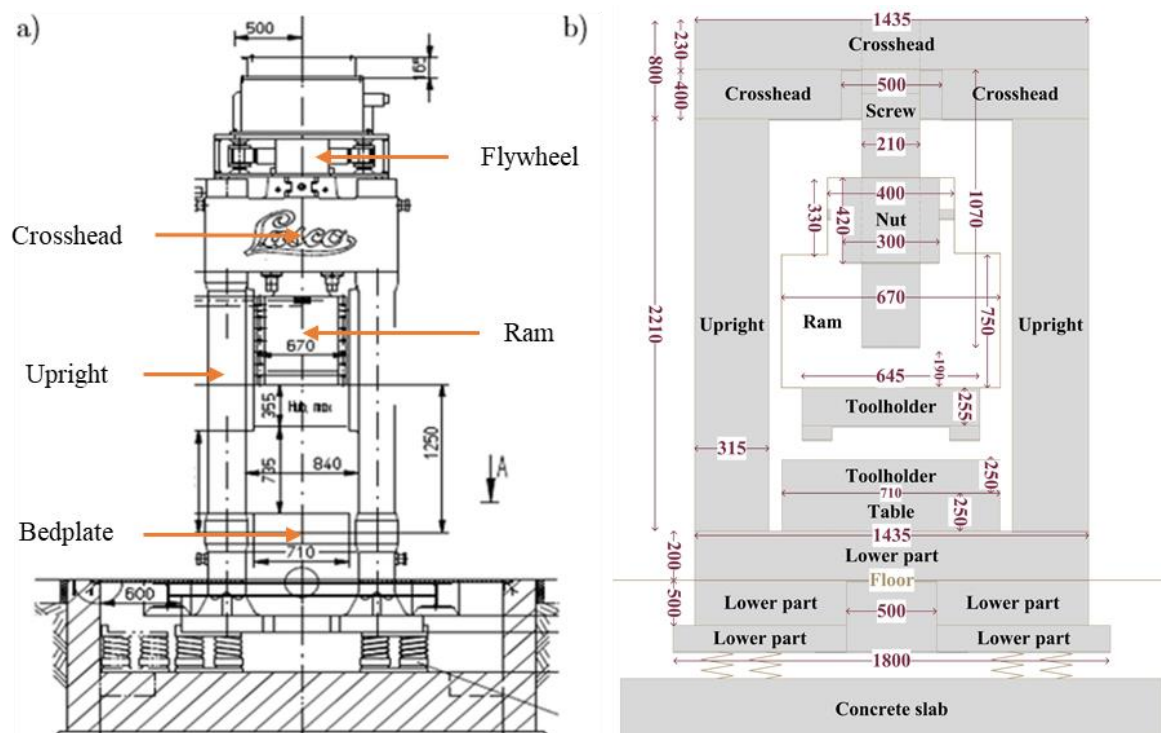


FIGURE 1. a) Vue de face de la presse à vis LASCO SPR400 b) Schéma des approximations géométriques des éléments de la presse (en mm)

Les formes standards choisies pour discrétiser la presse sont définies par une surface S et une longueur l_0 . En considérant un élément de la presse, selon la loi de Hooke on a :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Avec σ la contrainte appliquée sur la surface S , ε la déformation et E le module d'Young du matériau. En remplaçant dans l'Eq. (1), la contrainte et la déformation par leurs définitions, une expression de l'effort appliqué sur la surface S est obtenue via l'Eq. (2).

$$F = \frac{E \cdot S}{l_0} \cdot (l - l_0) \quad (2)$$


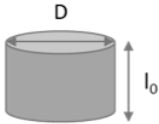
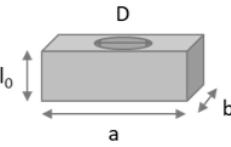
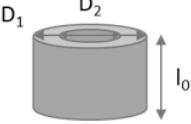
Avec F l'effort appliqué sur la surface S et $l-l_0$ l'allongement de l'élément. Ayant l'Eq. (2) et la relation entre l'effort et l'allongement d'un ressort Eq. (3), la raideur de l'élément peut être identifiée puis calculée selon son matériau et sa géométrie (Eq. (4)).

$$F = k.(l - l_0) \quad (3)$$

$$k = \frac{E.S}{l_0} \quad (4)$$

Pour chacune des formes définies dans le Tableau 1, il est possible de calculer une raideur associée grâce à l'Eq. (4). De cette façon, la raideur de chacun des éléments de la presse a été déterminée.

TABLEAU 1. Expression des raideurs pour des formes standards

Geometries	Diagram	Stiffness
Cuboid		$K_{Cuboid} = \frac{E.a.b}{l_0}$
Cylinder		$K_{Cylinder} = \frac{\pi.E.D^2}{4.l_0}$
Drilled cuboid		$K_{Drilled\ cuboid} = \frac{E.(a.b - \frac{\pi.D^2}{4})}{l_0}$
Tube		$K_{Tube} = \frac{E.\pi.(D_2^2 - D_1^2)}{4.l_0}$

La presse peut être modélisée comme une succession de ressorts, comme sur la Figure 2 où chaque ligne représente un élément tandis que les points indiquent le type de connexion, série ou parallèle. Pour chacun de ses éléments est associée une raideur propre. A ce stade, la traverse et la table de la presse ne sont pas encore modélisées.

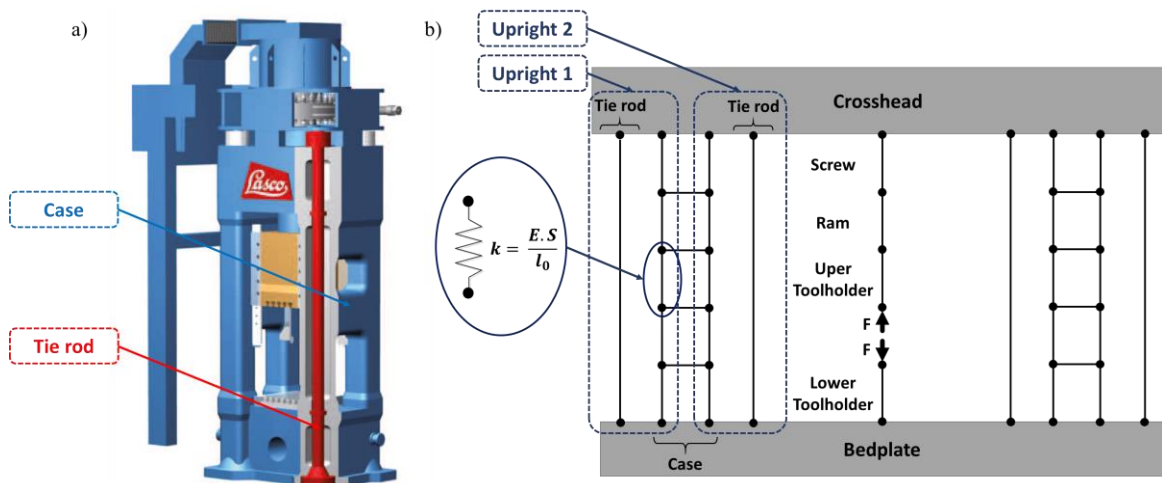


FIGURE 2. a) Structure de la presse à vis LASCO SRP400 b) Modèle statique élastique (SE) de la presse

Cette étude se concentre sur le calcul de la raideur équivalente des montants. Chaque montant est constitué d'un tirant précontraint en acier forgé et d'une enveloppe en fonte moulée comme cela est montré Figure 2. En tenant compte de la raideur de chaque élément et des liaisons entre les composants des montants, la raideur équivalente des quatre montants est calculée: $K_{SE} = 23.9 \cdot 10^9$ N/m.

3.2 Modèle Eléments Finis des montants

Pour l'analyse Eléments Finis (EF), le modèle CAO de la presse est créé avec CATIA V5 avec le module Generative Part Structural Analysis. Le maillage est défini comme régulier et des éléments paraboliques tétraédriques d'une taille de 50 mm sont choisis. Les montants sont modélisés en considérant les tirants en acier et l'enveloppe de fonte (Figure 3.a) et un effort de traction de 5000 kN est appliqué au-dessus des montants, la base des montants étant fixe. La raideur des montants est calculée selon l'Eq. (3) avec l'allongement vertical des montants résultant de la simulation EF : $K_{\text{MontantsEF}} = 24.5 \cdot 10^9$ N/m.

3.3 Comparaison des modèles

TABLEAU 2. Raideurs obtenues avec le modèle statique élastique (SE) et le modèle EF des montants

Modèle SE (N/m) *10 ⁹	Montants EF (N/m) *10 ⁹	Ecart type
23.9	24.5	2.4%

Les résultats donnés par le modèle statique élastique (SE) et la simulation sont similaires. En effet, l'écart type entre K_{SE} et $K_{\text{MontantsEF}}$ est de 2.4%. De légères différences entre les deux modèles dans les approximations faites sur la géométrie et les matériaux des éléments de la presse peuvent sans doute expliquer ce léger écart. Ainsi, dans le cas d'un effort axial, le modèle statique élastique permet de prédire la raideur d'une partie de la presse, même pour une structure complexe comme les montants. Cette approche peut s'appliquer à d'autres éléments de la presse.

4 Validation du modèle portique en EF

4.1 Modèle portique en EF

La CAO des montants est complétée avec l'ajout de la traverse pour modéliser le comportement de la presse comme une structure en portique (Figure 3.b). Une simulation EF est réalisée avec la même définition du maillage que précédemment. Un effort de 5000 kN est appliqué sur une surface circulaire centrée sur la partie inférieure de la traverse, qui correspond à la surface de la vis. Dans ces conditions, la contrainte causée par une opération de forgeage est simulée et la raideur des montants est calculée de la même façon que précédemment : $K_{\text{PressePortiqueEF}} = 14 \cdot 10^9$ N/m.

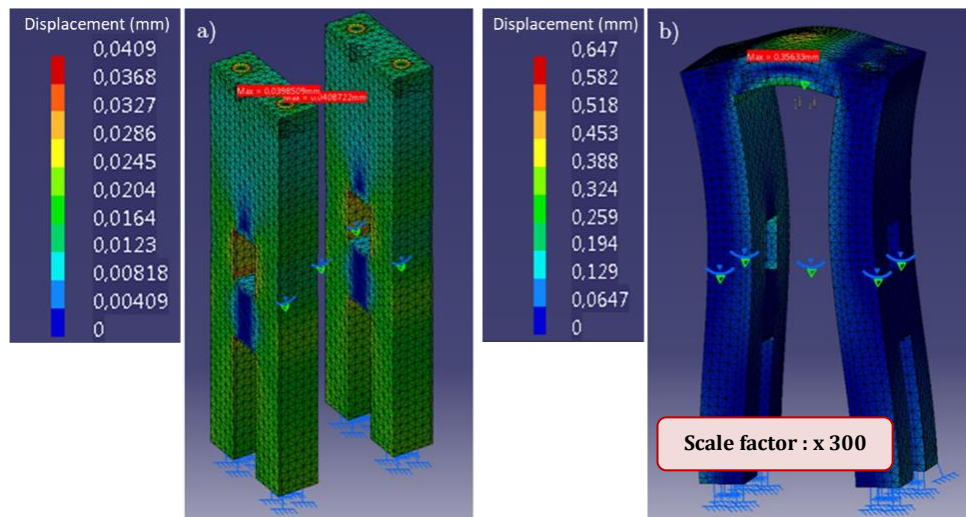


FIGURE 3. a) Résultat de la simulation EF des montants de la presse b) Résultat de la simulation EF de la presse approximée par une structure portique (facteur d'échelle multiplicateur de 300)

4.2 Mesure expérimentale de raideur

La détermination expérimentale de la raideur des montants nécessite la mesure de l'allongement des montants lors d'une opération de forgeage. Pour ce faire, un système de suivi de points 3D a été utilisé avec des mires réfléchissantes préalablement collées sur les montants (Figure 4.a-b).

Pour que l'allongement mesuré soit significatif, l'effort appliqué sur la structure doit être maximum et le temps de forgeage doit être suffisamment long pour permettre l'enregistrement de données suffisantes. Un choc inélastique sur un lopin en acier carbone C17, induisant un effort maximal de forgeage de 6414 kN a été choisi. Cet effort est proche de l'effort maximal que peut supporter la presse. De plus, le lopin est choisi avec un grand rapport d'élanement (hauteur/diamètre) pour augmenter le temps de forgeage et enregistrer un maximum de données.

L'expérience a été répétée deux fois, les courbes d'effort et d'allongement se confondent pour les deux essais. Ainsi, la frappe est considérée comme répétable, et pour des raisons de clarté, seul un des essais sera étudié en détail par la suite (Figure 4.c).

Les données enregistrées par le système de suivi de points 3D ne peuvent être utilisées directement. En effet, le système mesure la distance entre deux mires mais pas directement l'allongement total du montant. La déformation du montant est supposée linéaire pour calculer l'allongement total.

Connaissant l'effort appliqué et l'allongement, la raideur des montants est calculée avec l'Eq. (3) pour chaque mesure. La valeur moyenne est ensuite calculée : $K_{Exp} = 13.1 * 10^9$ N/m.

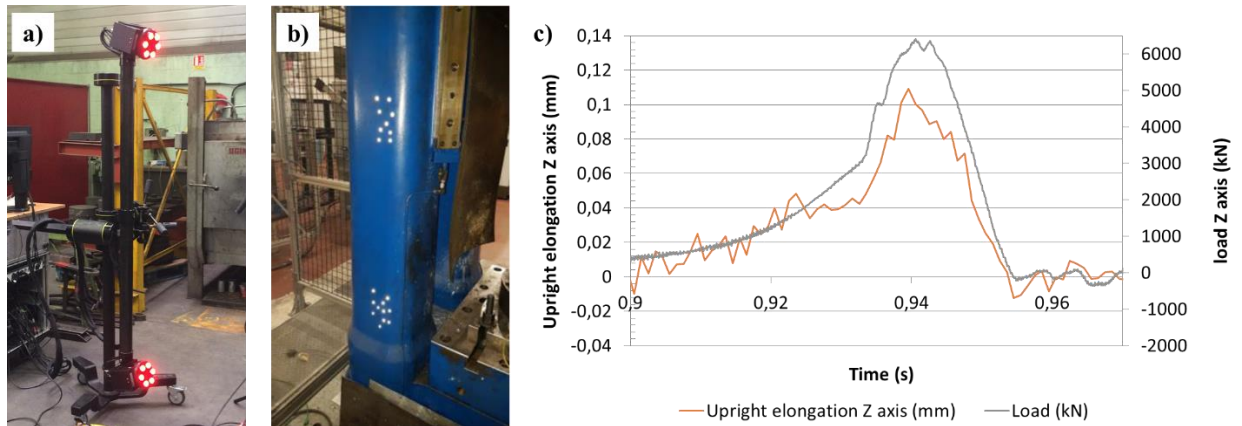


FIGURE 4. a) Le système de suivi de points 3D b) les mire réfléchissantes collées sur un montant de la presse c) l'allongement d'un montant et l'effort mesuré lors d'une frappe sur l'acier carbone C17

4.3 Comparaison expérience/simulation

TABLEAU 3. Raideurs obtenues expérimentalement et par analyse EF avec la presse modélisée par une structure portique

Simulation EF Presse Portique (N/m) *10 ⁹	Expérimental (N/m) *10 ⁹	Ecart type
14.0	13.1	6.9%

On remarque que la simulation EF avec la presse en structure portique donne des résultats similaires à ceux obtenus expérimentalement, en effet l'écart type entre $K_{\text{PressePortiqueEF}}$ et K_{Exp} est de 6.9%. Cette différence entre les deux raideurs peut venir : expérimentalement d'un manque de précision des capteurs ou numériquement des approximations faites dans le modèle EF sur les géométries et les matériaux de la presse. Malgré l'hypothèse simplificatrice d'une structure portique pour modéliser la presse à vis, la simulation EF prédit correctement le comportement de la presse observé expérimentalement. L'utilisation de cette approximation d'une structure portique en simulation EF peut donc être un bon moyen de prédire l'effort axial et les moments appliqués aux montants en considérant les liaisons entre les différents éléments de la structure et le comportement en flexion de la traverse. Une approche couplée entre simulation EF et modèle analytique pourrait être un moyen d'améliorer le modèle statique élastique en considérant les liaisons et la flexion. Car en effet, en ne tenant pas compte des effets de torsion et de flexion, ni des liaisons entre les composants de la presse, le modèle des montants surestime de façon significative (71 %) la raideur par rapport au modèle du portique.

5 Conclusions

Cette étude propose de prédire la raideur des montants d'une presse à vis grâce à un modèle statique élastique (SE) défini par la géométrie et les matériaux de la presse. Des simulations Eléments Finis (EF) des montants de la presse et de la presse complète modélisée comme un portique ont été réalisées. Les résultats expérimentaux et numériques nous permettent de déterminer plusieurs valeurs de raideurs pour les montants. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. Le modèle statique élastique (SE) est suffisant pour expliquer le comportement des montants sans prendre en compte la traverse de la presse. Si pour d'autres éléments de la presse, les effets de liaisons et la flexion peuvent être négligés, alors le modèle peut prédire leur raideur ;
2. Une modélisation simplificatrice de la presse en structure portique permet de bonnes prédictions pour déterminer la raideur des montants par simulation EF. Cette méthode peut être une solution appropriée pour prédire les moments et les efforts appliqués sur les montants de la presse ;
3. La prochaine étape pourrait être d'améliorer les prédictions du modèle statique élastique en considérant le comportement en flexion de la traverse et les effets de liaisons dans la structure de la presse. La simulation EF de la presse à vis par une structure portique pourrait être un bon moyen d'étudier ces effets et de compléter le modèle statique élastique en intégrant ces aspects.

Références

- [1] C. Durand, R. Bigot, and C. Baudouin, Contribution à la caractérisation des moyens de mise en forme: application aux presse à vis, 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018.
- [2] VDI-Standard: VDI 3193, Hydraulic presses for cold forging and sheet metal working, measuring instruction for acceptance, VDI-Verlag GmbH (1986).
- [3] K. Chodnikiewicz, R. Balendra, and T. Wanheim, A new concept for the measurement of press stiffness, *Journal of Materials Processing Technology* 44, (1994) 293-299
- [4] M. Arentoft, M. Eriksen, and T. Wanheim, Determination of six stiffnesses for a press, *Journal of Materials Processing Technology* 105, (2000) 246-252
- [5] H. Ou and C.G. Armstrong, Evaluating the effect of press and die elasticity in forging of aerofoil sections using finite element simulation, *Finite Elements in Analysis and Design* 42, (2006) 856-867
- [6] M. Arentoft and T. Wanheim, A new approach to determine press stiffness, *CIRP Annals* 54, (2005) 265-268
- [7] C. Brecher, W. Klein, and M. Tannert, Optimization of multi-stage closed-die forging processes by coupled simulation of the machine and the forging processes, *Production Engineering* 4 (2010) 279-286
- [8] B.-A. Behrens, C. Brecher, M. Hork, and M. Werbs, New standardized procedure of the measurement of the static and dynamic properties of forming, *Production Engineering* 1 (2007) 31-36
- [9] B. Lu and H. Ou, Quantification of press elasticity in the forging of three-dimensional complex shapes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226, (2012) 466-477
- [10] M. Croin, A. Ghiotti, and S. Bruschi, Influence of forming machine stiffness on product quality in hot forging operations, in (AIP, 2007), pp. 493-498