

Conclusion

Les résultats engrangés depuis le démarrage des travaux en 2017 ont permis de **caractériser des solutions et d'évaluer ainsi l'intérêt de la technologie**. L'outillage de démonstration développé avec les solutions de chauffes, d'isolation et de nuance outillages les plus probantes a ainsi pu être qualifiée en **phase de chauffe et de maintien sur une plage de température oscillant de 200°C à 900°C** suivant différentes configurations d'essais. Les **résultats ainsi obtenus sont très encourageants en termes de capacité de chauffe et de comportement de l'armoire de régulation** qui permet d'atteindre les consignes de température sans pour autant générer de risque de détérioration de l'installation.

Une confrontation des résultats obtenus expérimentalement avec ceux de l'étude de simulation thermique ont permis de **qualifier également la conception de l'ou-**

tillage, notamment en termes d'environnement de travail, mais aussi de respect des préconisations de température d'utilisation des différents matériaux mis en œuvre, tels que le MICA ou encore le MACOR. Dans une configuration industrielle, **des optimisations de l'isolation seraient à envisager pour permettre de reproduire les conditions de simulations, plus favorables à un environnement industriel.**

Nos différentes investigations ont ainsi permis de **répondre aux objectifs de l'étude** qui consistait à **développer un outillage isotherme et à valider sa capacité de chauffe dans des conditions semi-industriels.**

Des pistes de poursuites des investigations restent à explorer ; telles que l'évaluation **du bilan énergétique de l'installation** et son **apport dans la réduction des consommations d'énergie** ou encore d'affiner la **méthodologie de dimensionnement** d'un tel outillage par simulation numérique.



Dr. Nadine EL KOSSEIFI
Responsable des comptes techniques et coordinatrice marketing Transvalor S.A.



Patrice LASNE
Expert Ingénierie Transvalor S.A.



Dr. Marc MORENO
Ingénieur Développement & Matériaux Transvalor S.A.



Stephane ANDRIETTI
Directeur des Partenariats Technologiques Transvalor S.A.

Contrôle énergétique des procédés de forgeage libre à travers la simulation

Les sociétés qui ont recours aux procédés de forgeage libre sont confrontées à de nombreux défis, notamment la concurrence internationale accrue, la nécessité de réduire les émissions de CO₂ pour protéger le climat, ainsi que l'augmentation des coûts de l'électricité et du gaz. Pour répondre à ces objectifs et contraintes, il est crucial d'optimiser la gamme de forgeage libre. Cet article vise à démontrer les avantages des logiciels de simulation de forgeage à chaud, associés aux technologies de mesure développées pour le forgeage libre, afin de rendre le processus de forgeage et le traitement thermique encore plus économes en énergie.

Les défis de l'industrie de la forge libre

Aujourd'hui et demain, l'industrie du forgeage libre devra faire face à de nombreux nouveaux défis. La forte pression des concurrents internationaux sur le marché des grandes pièces forgées (par exemple, les arbres de générateurs et de turbines, les aciers à outils pour l'industrie de la plasturgie) a entraîné de plus en plus de commandes de composants de sécurité auprès des forges libres étrangères et cette tendance continue.

Les concurrents étrangers peuvent produire de manière plus rentable, par exemple, parce que les prix de l'énergie (électricité pour faire fonctionner les presses hydrauliques ; gaz naturel pour faire fonctionner les fours de forgeage et de traitement thermique) sont plus bas, les frais de personnel sont moins élevés et les réglementations environnementales (absence de tarification du CO₂, faibles normes de protection contre les émissions) n'entraînent pas de coûts significatifs.

Dans le domaine de l'approvisionnement énergétique, la situation de la forge libre s'est récemment considérablement dégradée en Europe.

Les prix de l'électricité sont soumis à de fortes fluctuations (et ont également fortement augmenté en moyenne), de sorte que, par exemple, le prix à la bourse de l'électricité de Leipzig (EEX, European Energy Exchange AG) pour 1 MWh a fluctué entre 0 € et 700 € au 1^{ère} quinzaine de mars ; le prix moyen de l'électricité par MWh a presque quadruplé par rapport à 2019.

L'augmentation des coûts d'approvisionnement en énergie électrique a un impact direct sur les coûts de production et nuit à la concurrence internationale.

FAÇONNONS LE FUTUR
AVEC DES MATÉRIAUX ET PRODUITS CHIMIQUES DE HAUTE PERFORMANCE



ASSISTANCE NUMÉRIQUE

Façonnons le futur avec nos services digitaux.

Nos solutions de support centrées sur le client vous aident dans vos défis sur site ou numériquement à distance.

ASK Online Academy vous donne un accès rapide à notre expertise et à notre meilleure connaissance de nos puissants produits et services.

ASK VISTA est votre outil pour garder un suivi sur les conteneurs et pour éviter les ruptures de produit

ASK NOW service virtuel distant vous donne un accès rapide à nos ressources et services techniques

Plus d'informations sur www.ask-chemicals.com/digital-services

DÉFIS SUR SITE

ASKCHEMICALS 







De même, la situation conflictuelle actuelle en Europe contribue à une forte augmentation, quoique peut-être à court terme, du coût de l'approvisionnement énergétique des forges libre.

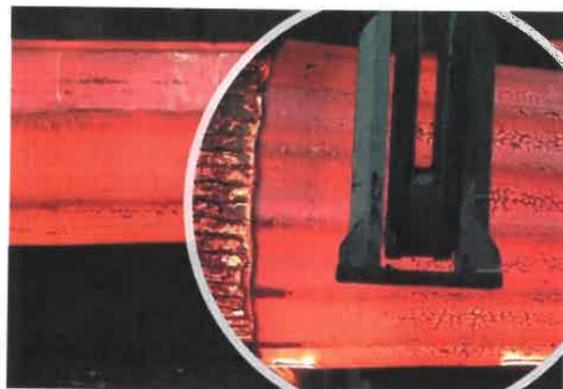


Figure 1: Vue d'un processus standard de forgeage libre pour la production d'un grand composant en acier (image :VDM Metals)

Par conséquent, l'industrie du forgeage libre doit sérieusement s'attaquer aux problèmes suivants, dès à présent :

- Économies d'énergie dans la zone de production (réduction de la consommation de gaz et d'électricité)
- Réduction des émissions de CO₂
- Développement de gammes de forgeage plus efficaces
- Plus de rendement par bloc de coulée utilisé
- Réduction des rebuts (augmentation de la qualité du produit)

Des mesures pour accroître la compétitivité

Les options suivantes sont disponibles à court terme pour l'ingénieur Process (ou de production) de la forge libre ou pour le service Qualité afin de pouvoir réagir aux points mentionnés ci-dessus :

- Economie de gaz lors de l'utilisation de fours de forge : Par exemple, la chaleur résiduelle d'un lingot coulé peut être prise en compte lors de la montée en température de forgeage si la logistique entre la fonderie et la forge le permet. L'utilisation de la chaleur résiduelle dans le lingot de coulée permet de réduire le temps de chauffe nécessaire pour obtenir un lingot homogène. Il existe également un potentiel d'optimisation du réchauffage nécessaire dans les opérations de forgeage multi-chauffes. La connaissance précise de l'énergie de forgeage permet de déterminer le temps de réchauffage nécessaire, ce qui assure un réchauffage homogène à la température de forgeage.

- Economie de gaz lors de l'utilisation de fours de traitement thermique :

Les spécifications ou courbes de traitement thermique peuvent être optimisées en analysant les temps nécessaires à certaines zones pour atteindre la température d'austénitisation, par exemple, ou en déterminant le temps de maintien optimal. Cela peut être effectué à l'aide de thermocouples ou, de manière plus économique, en utilisant un logiciel de simulation éléments finis.

- Développement de gammes de forgeage plus performantes :

Afin d'obtenir des déformations suffisantes dans les grandes pièces forgées, des taux de corroyage globaux ou taux d'écrasement sont imposés par le client ou par des prescriptions internes à l'usine (généralement le degré d'étirage ou le rapport entre le diamètre initial et le diamètre final d'une pièce forgée) afin d'obtenir les propriétés souhaitées (généralement la fermeture des porosités dues à la coulée).

Le taux de corroyage global ne prend pas en compte la déformation locale dans la zone où doit avoir lieu la fermeture des porosités de coulée ce qui est pourtant nécessaire pour la suppression des défauts. A cela s'ajoute le fait qu'un taux d'écrasement ne peut pas être simplement extrapolé d'un petit diamètre à un grand diamètre.

Pour les pièces forgées de grande taille, le problème est que pour obtenir le taux de corroyage souhaité. Les étapes de production «préforgeage par écrasement» s'ajoutent souvent à un cycle de forgeage. Cela augmente le nombre de chauffes de forge nécessaires et réduit le rendement en augmentant le coût du produit et en limitant les dimensions possibles de la pièce forgée.

Il s'agit d'éviter, dans la mesure du possible, le nombre d'opérations tout en garantissant la fermeture des porosités. Cela peut se faire par exemple en considérant l'évolution du taux de déformation local et des contraintes dans le matériau lors de l'analyse du procédé de forgeage.

Les gammes de forgeage à plusieurs chaudes offrent également des possibilités d'optimisation. Par exemple, la séquence de forgeage peut être simplifiée en augmentant les déformations entre deux remises au four. Dans ce cas, il faut adapter le procédé pour ne pas dépasser les capacités de forgeage des presses et ne pas trop chauffer la pièce ce qui aurait une influence défavorable sur les propriétés du matériau.

- Plus de rendement par bloc de coulée : En se référant à la section précédente, on peut dire que le rendement peut être augmenté en évitant les étapes d'écrasement. Par exemple, en forgeant purement par étirement de grands lingots polygonaux ou en évitant l'accumulation de matière provoqué par les étapes d'écrasement.

- Réduction des rebuts :

Pour les grands composants forgés, les porosités liées à la coulée imposent des exigences particulières à l'exécution du procédé de forgeage. Outre la rupture de la structure coulée et la mise en place d'un grain de forgeage fin, la fermeture des porosités est la tâche la plus importante du forgeage libre.

Dans le cas de composants importants pour la sécurité tels que les arbres de turbine à vapeur ou de générateur, les porosités ouvertes sont un critère absolu de rejet, car elles peuvent conduire à une défaillance totale du composant et, par exemple, à la destruction complète associée d'une turbine à vapeur ou à gaz sous les charges mécaniques qui se produisent pendant le fonctionnement. Par conséquent, s'assurer qu'un composant important pour la sécurité est exempt de fissures et/ou de porosités doit être une priorité absolue pour l'industrie de l'énergie lors de la planification du procédé de fabrication.

Simulation du forgeage à chaud et de la coulée de lingot : des outils indispensables pour optimiser la forge libre

Dans des marchés concurrentiels et en constante évolution, les outils de simulation des procédés sont essentiels pour le cycle de développement de pièces métalliques à haute valeur ajoutée. Ils permettent aux fabricants de forgeage des métaux de répondre aux attentes sur de nombreux aspects cruciaux. Afin de maîtriser la qualité et les performances finales d'un produit forgé, il est indispensable de posséder une connaissance approfondie de toutes les étapes du processus de fabrication, depuis la fonderie jusqu'au forgeage et au traitement thermique.



Figure 2 : Séquence de martelage classique à partir d'un gros lingot coulé (image :Transvalor)

Les logiciels de simulation de coulée et de forgeage à chaud THERCAST® et FORGE® sont des outils essentiels pour l'industrie de la forge libre, car ils permettent une approche globale pour la simulation complète du procédé. Le logiciel de simulation de coulée THERCAST® est particulièrement utile pour simuler le procédé de coulée de gros lingots. Grâce à la modélisation du remplissage et de la solidification du métal, la simulation de coulée permet de calculer la probabilité et la position de l'apparition de vides ou de discontinuités, ce qui est crucial pour garantir la qualité des lingots qui serviront à la fabrication des pièces forgées.

Grâce à l'interopérabilité des solutions Transvalor, les résultats de simulation de coulée peuvent être transférés directement dans le logiciel de mise en forme des métaux. Cela permet de visualiser l'impact du procédé de forgeage sur la zone contenant des porosités issues de la coulée. Une simulation thermique peut également être effectuée pour simuler le transport du lingot de coulée et son chauffage dans un four, ce qui permet de déterminer le temps de chauffage optimal et d'optimiser les économies d'énergie.

De plus, les résultats de la simulation de forgeage peuvent être utilisés pour déterminer le temps de réchauffage nécessaire pour le prochain processus de forgeage, garantissant ainsi un chauffage homogène pour une future utilisation. Cette application de la simulation contribue également à réduire les coûts énergétiques et les émissions de CO₂.

L'exemple industriel illustré à la Figure 2 montre une séquence complète de forgeage libre qui peut être simulée, y compris les étapes de chauffage, transfert, martelage et trempe finale.

Les modèles utilisés pour prédire la fermeture des porosités estiment l'évolution du volume de ces dernières en fonction de la déformation subie lors d'un état de compression ou de traction. Une prédiction précise et efficace du modèle de déformation est également cruciale, car elle permet d'évaluer la fermeture de la porosité en se basant sur les valeurs de déformation calculées.

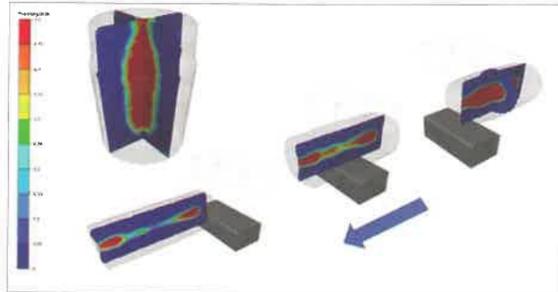


Figure 3 : Fermeture de la porosité depuis la coulée jusqu'au 1^{re} étape de martelage (image : Transvalor)

A la fin du procédé de forgeage, les porosités du matériau sont presque entièrement fermées. Toutefois, une petite zone subsiste sur un côté du produit, ce qui montre que la séquence de forgeage pourrait encore être optimisée. cf Figure 4

Un deuxième objectif majeur du forgeage libre est l'amélioration de la structure interne du métal. En effet, la microstructure et la taille des grains dans le lingot issu de la coulée ne sont généralement pas compatibles avec les caractéristiques requises pour la pièce fabriquée. En première approximation, la microstructure et la fermeture des porosités sont étroitement liées à la déformation locale dans la pièce forgée.

La simulation permet de modéliser les phénomènes de recristallisation qui se produisent lors des étapes de mise en forme, tels que la recristallisation dynamique, ainsi que lors des étapes de transfert ou de réchauffage, comme la recristallisation statique ou métadynamique. En forge libre, du fait de l'alternance des phases de déformation et des temps d'attente entre chaque passe, tous les types de recristallisation ont lieu. La simulation ci-dessous montre comment le diamètre moyen des grains (ASTM) varie au cours du procédé.

Une fois le procédé de forgeage terminé, il est généralement suivi d'un traitement thermique. La simulation permet de modéliser une grande variété de proc de traitement thermique (par exemple, trempe, recuit, revenu, austénitisation, ...) pour calculer le comportement de chauffage et déterminer le temps de chauffage nécessaire. Elle permet également de tester l'impact des milieux de trempe. Il est essentiel de contrôler le transfert de chaleur entre la pièce et le milieu de trempe pour éviter les défauts tels que la déformation et la fissuration, et pour obtenir de bonnes propriétés mécaniques.

De nouvelles stratégies et améliorations de forgeage peuvent ensuite être testées à l'aide de la simulation, par

exemple la validation d'une gamme plus courte. La simulation permet également de répondre à des questions telles que «La force de la presse est-elle suffisante pour le nouveau forgeage ?», «La température finale de forgeage est-elle sous-estimée ?», et «Le forgeage appliqué assure-t-il une fermeture fiable des porosités ?».

Nouveau modèle pour simuler la croissance de la calamine

Un nouveau modèle de prédiction de l'épaisseur et de la masse de calamine formée sur l'acier pendant les processus à haute température a été développé. Le modèle est applicable à la croissance de la couche de calamine sur le fer pur et les aciers faiblement alliés. Il inclut deux mécanismes de croissance : la croissance par diffusion et la croissance par absorption de surface.

Les couches d'oxydes sont composées de trois phases : la wüstite (FeO), la magnétite (Fe₃O₄) et l'hématite (Fe₂O₃). Pour des températures inférieures à 900°C, la wüstite est le constituant principal (environ 95% en volume), ce qui influence fortement sur les propriétés de la calamine. La wüstite est la phase la plus molle et est particulièrement sensible à la dissolution des espèces chimiques en raison de la forte présence de lacunes de Fe à l'intérieur du réseau cristallin (entre 5 et 16%).

Cependant, la fraction volumique de wüstite peut évoluer avec la température (stabilité thermodynamique) et le temps (diffusion des éléments à travers la couche), où l'augmentation des concentrations d'oxygène conduit successivement à la formation de la wüstite, puis de la magnétite et de l'hématite. Dans de nombreux cas industriels où la température dépasse 900°C, la wüstite reste le constituant principal de la calamine.

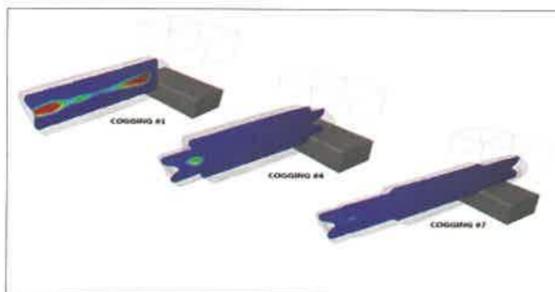


Figure 4 : Fermeture d'une porosité interne du début à la fin du procédé (image : Transvalor)

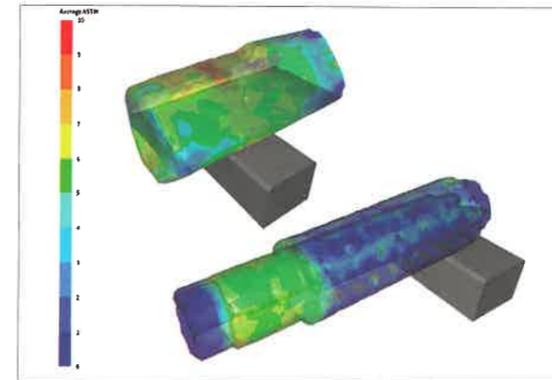


Figure 5 : Évolution de la taille moyenne des grains (ASTM) lors du procédé de mise en forme (image : Transvalor)

Pour une croissance contrôlée par la diffusion d'oxygène, l'épaisseur de la calamine peut être prédite à partir de la réaction chimique. Une équation parabolique est utilisée dans le logiciel FORGE® pour calculer l'épaisseur de la calamine en cm, en supposant une couche de wüstite à 100% :

$$x_{FeO} = \frac{1 + \frac{M_{Fe}}{M_O}}{\rho_{FeO}} \times k_e \times \exp\left(-\frac{Q_{scale}}{RT}\right) \sqrt{t}$$

Dans cette équation, le constant k_e est fixé à 11, tandis que Q_{scale} est l'enthalpie d'activation en J.mol⁻¹, qui peut varier en fonction de la nuance de l'acier. En modifiant la valeur de Q_{scale} , on peut adapter cette loi à une large gamme de nuances d'acier ou d'atmosphères de four (par exemple, des concentrations de CO₂ faibles ou élevées).

Il convient de noter que les caractérisations expérimentales sont plus précises lorsque la perte de masse est prise en compte. Les couches d'oxydes ne sont pas compactes en raison de la présence de différents défauts tels que des fissures, des rainures, des porosités ou des cloques. Si ces défauts ne sont pas pris en compte, ils peuvent conduire à une surestimation des épaisseurs de calamine mesurées d'au moins 30 %. Pour cette raison, les mesures basées sur la perte de masse offrent plus de fiabilité.

En conséquence, les comparaisons entre les données de simulation et les mesures expérimentales dans la section suivante sont réalisées en utilisant des mesures de perte de masse.

La comparaison entre les simulations et les données de référence présentées dans la figure 6 démontre une bonne corrélation. Cette comparaison met en évidence la fiabilité du modèle de croissance de la calamine pour des périodes courtes et longues. Il est à noter que, dans ce cas, la croissance de la calamine a été contrôlée uniquement par diffusion.

La figure 7 illustre la croissance de la calamine pendant l'étape de réchauffage qui suit la 4^e opération de martelage. La pièce est chauffée à 1250°C pendant 5 heures.

Techniques de mesure moderne pour le forgeage libre

Dans le cadre de la forge libre, il est crucial d'avoir une compréhension détaillée du comportement de l'équipement de forgeage. C'est pourquoi de nombreux équipementiers et éditeurs de logiciels ont déployé des efforts pour assurer la meilleure interopérabilité possible entre les systèmes d'acquisition temps réel et les logiciels de simulation.

Le système de mesure «LaCam® Forge» est un système de mesure innovant pour les ateliers de forge libre, qui se compose de deux composants. Tout d'abord, une «unité en ligne» qui enregistre toutes les données pertinentes du procédé (force de forgeage, position du mandrin et du manipulateur, température de surface, etc.) sous la forme d'une table de course pendant une opération de forgeage et calcule simultanément la déformation dans la zone centrale du bloc de forgeage.

Le deuxième composant est un scanner laser 3D spécialement conçu pour les surfaces chaudes et les conditions environnantes des aciéries. Le laser 3D peut enregistrer les contours d'une pièce forgée en 3D et peut être utilisé, par exemple, pour la mesure dimensionnelle ou le contrôle de la géométrie (rectitude). La mesure de distance est basée sur une mesure de type temps de vol à l'aide d'un laser à semi-conducteur pulsé dévié dans deux directions. Le rayonnement thermique est mesuré et offre la possibilité de mesurer la répartition de la température de surface de la pièce.

Le système de mesure peut être utilisé avant le forgeage pour mesurer la répartition de la température de surface ou pour marquer les lignes de séparation sur le lingot, pendant le forgeage (après chaque passe) et après le forgeage pour mesurer la cote finale ou la rectitude.

Il est possible de transférer les données cinématiques réelles du procédé de forgeage issues de systèmes de mesure comme «LaCam® Forge» (MINTEQ Ferrotron) développé pour l'industrie du forgeage libre dans le logiciel FORGE®. Par conséquent, n'importe quel type de données cinématiques réelles peut être intégré à l'aide d'un puissant langage de script «MPFx» qui décrit précisément chaque mouvement (pièce et/ou matrice).

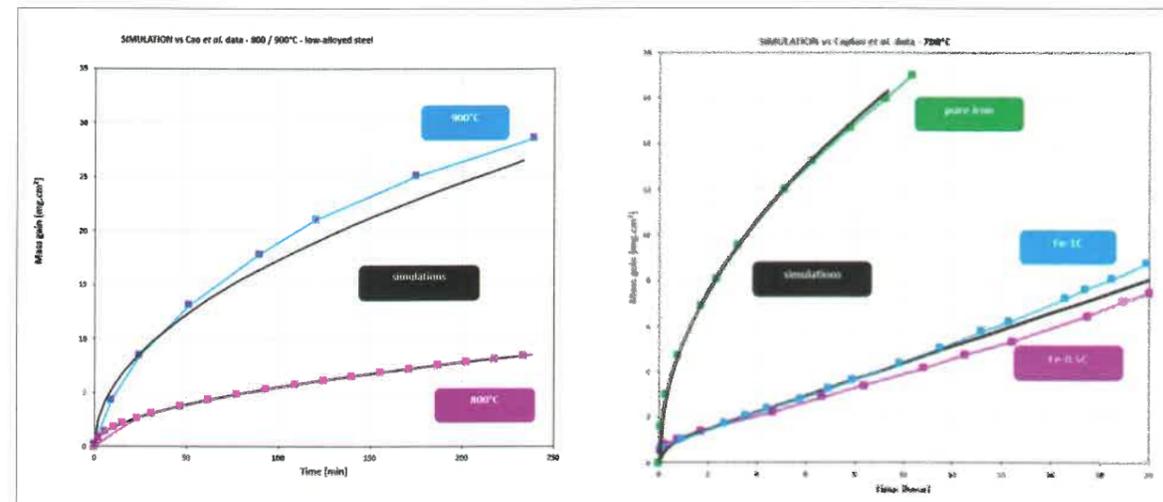


Figure 6 : Comparaison des données expérimentales et des résultats de simulation : (a) Caplan et al. pour Fe-0.5C and Fe-1.0C) à 700°C durant 20h. (b) Cao et al. obtenu à 800 et 900°C

La séquence de martelage et ses effets sur une pièce forgée peuvent être analysés sous de nombreux aspects : l'influence de la largeur de l'étampe, de l'avance du manipulateur de forgeage, de la diminution de la hauteur, de l'angle de rotation du manipulateur, etc. La courbe de température, la déformation locale, l'historique des contraintes, la force requise ou la valeur de probabilité de fermeture des porosités peuvent être déterminés. Cela signifie qu'il est possible d'afficher et d'analyser les procédés de forgeage réels dans une «forge virtuelle» et d'identifier leurs points faibles, par exemple en termes de fermeture des porosités.

Conditions préalables pour une utilisation réussie de la simulation de forgeage à chaud en forgeage libre

Pour une utilisation efficace de la simulation de forgeage à chaud en forgeage libre, il est recommandé d'avoir une personne responsable sur site dans l'atelier qui a une connaissance approfondie des procédés de forgeage et de traitement thermique, une base solide en technologie de mise en forme et en science des matériaux, et une certaine expérience en analyse de données assistée par ordinateur.

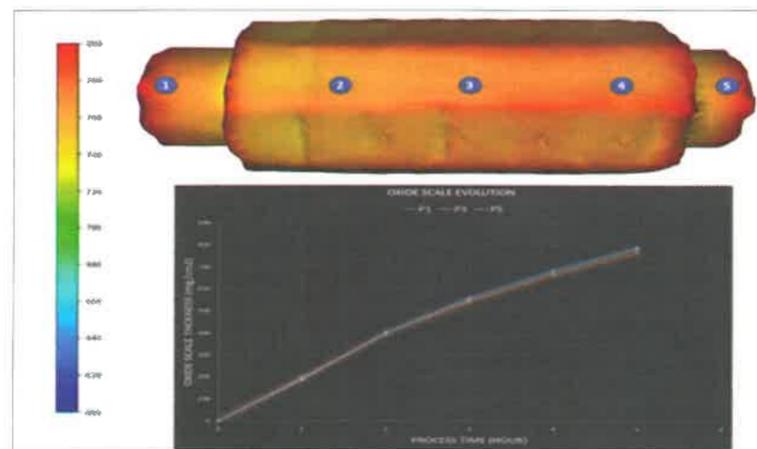


Figure 7 : Évolution de la calamine en surface (en mg/cm²)

Au cours des trois dernières décennies, les performances des systèmes informatiques ont considérablement augmenté tandis que le coût d'acquisition a diminué, de sorte que l'acquisition de matériel ne représente qu'une petite partie du coût total des logiciels de simulation. Dans le domaine de la métrologie, il est essentiel d'avoir accès à des données de mesure pertinentes dans l'environnement de la forge à ciel ouvert, telles que les températures de surface des pièces forgées (mesurées par pyrométrie ou thermographie), les forces et la cinématique de forgeage (par exemple, les données de commande de la presse et du manipulateur), ainsi que les températures des fours de forgeage et des fours de traitement thermique.

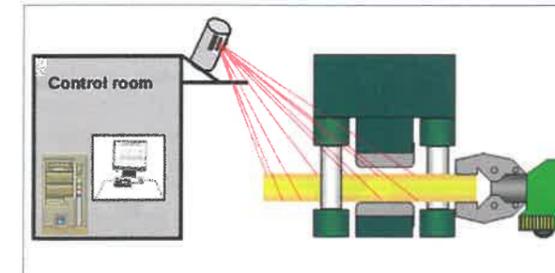


Figure 8 : Principe du système de mesure (image: MINTEQ Ferrotron)

Ces données sont importantes pour la création de modèles Eléments Finis réalistes et peuvent également servir à comparer et à calibrer les modèles avec les données «réelles». Ce modèle, calibré avec des données réelles, permet ensuite l'analyse des procédés de forgeage existants ou offre la possibilité que de nouvelles séquences puissent être réalisées et analysées dans la «forge virtuelle» au moindre coût.

Conclusion & perspectives

Face aux défis actuels, l'industrie de la forge libre doit rapidement adapter son ingénierie pour atteindre les objectifs écologiques dictés par le réchauffement climatique et réagir à l'augmentation soudaine du coût de l'énergie.

Cet article montre comment des outils de simulation numérique efficaces permettent de surmonter ces défis. Ainsi, les ingénieurs procédés peuvent travailler en antici-

pant des gammes de forgeage innovantes et ambitieuses. En conséquence, les processus de fonderie et de forgeage sont optimisés pour économiser de la matière (réduction des chutes), garantir une meilleure qualité des produits (moins de rebuts) et trouver les conditions de traitement thermique les plus efficaces (économies d'énergie).

La fabrication virtuelle prouve son utilité en augmentant la qualité des produits sous de nombreux aspects :

- Amélioration du rendement en réduisant la quantité de matière engagée bavaures
- Minimisation de la porosité et de la formation de phases indésirables
- Étude de l'effet de l'épaisseur de calamine sur l'évolution de la température pour un meilleur contrôle du temps de réchauffage

De plus, les logiciels de simulation interagissent parfaitement avec la technologie de mesure en temps réel (LaCam® Forge) qui décrit précisément le comportement des pièces et des matrices dans la pratique. La combinaison intelligente d'un logiciel de simulation de pointe avec un système de mesure moderne aide à trouver les optimisations les plus efficaces de la gamme de forge libre. Elle apporte définitivement à l'industrie sidérurgique des atouts remarquables pour améliorer la productivité et conduire vers les applications les plus ambitieuses basées sur les technologies du jumeau numérique.

Article publié dans Stahl en Mars 2022