



HAL
open science

Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages métalliques

Lola Lilensten, Mathilde Laurent-Brocq

► **To cite this version:**

Lola Lilensten, Mathilde Laurent-Brocq. Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages métalliques. Livre Blanc : Les matériaux au cœur des enjeux post-covid, 2021. hal-03300769

HAL Id: hal-03300769

<https://hal.science/hal-03300769>

Submitted on 27 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages métalliques

Lola Lilensten¹, Mathilde Laurent-Brocq²

¹ : Institut de Recherche de Chimie Paris, Chimie ParisTech, CNRS, PSL Research University, Paris, 75005, France

² : Univ Paris Est Creteil, CNRS, ICMPE (UMR 7182), Thiais, France,

Mots Clefs : recyclage, métaux, alliages, procédés, conception, propriétés, impuretés

Constat Post COVID sur le thème

La production mondiale d'acier et d'aluminium pour l'industrie représente une consommation d'énergie avoisinant les 53.10^{18} J, soit environ 8% de l'énergie mondiale et 30% des émissions industrielles de CO₂. Ces deux alliages de structure sont aussi présents dans les domaines du transport et de la construction, dont l'empreinte carbone est également considérable (chaque domaine émettant plus de 7 GtCO₂ en 2012, pour environ 10 G tCO₂ pour l'industrie dans son ensemble) (Allwood & Cullen, 2012).

Afin de réduire les émissions de CO₂ pour limiter le réchauffement climatique, suivant les objectifs de 40% de réduction des émissions pour 2030 par rapport aux niveaux de 1990 émis par l'Union Européenne (*2030 Climate & Energy Framework (European Commission)*, n.d.), il est donc primordial que la métallurgie, tout comme les autres secteurs, s'empare de ces aspects. Ceci est d'autant plus urgent que la demande en matériaux de structure des pays émergents augmente.

Plusieurs approches devront sans aucun doute être implémentées en parallèle pour parvenir à faire diminuer ces émissions de carbone. Elles imposent d'agir à chaque étape du cycle de fabrication et de production des alliages, des minerais jusqu'au recyclage final des produits, et de développer de nouveaux alliages plus durables : incorporant une quantité d'alliages recyclés supérieure, recyclable et à la durée de vie allongée (plus résistant mécaniquement, plus léger, moins sensible à la corrosion) (Raabe et al., 2019).

Cette contribution se concentre plus spécifiquement sur les aspects de recyclage. En effet, contrairement à d'autres matériaux, les métaux et alliages ont l'avantage de pouvoir être

recyclés théoriquement à l'infini. Cependant, la part de matière recyclée dans la production totale est de seulement 45% pour l'acier et 30% pour l'aluminium, ce qui laisse une grande marge d'amélioration (Raabe et al., 2019). Le recyclage est pourtant souhaitable, considérant que la production d'une tonne d'alliage d'aluminium à base d'alliage recyclé consomme seulement environ 5 à 8% de l'énergie nécessaire à la production d'aluminium à partir de la bauxite (Choate & Green, 2004; Zhang et al., 2016).

Plusieurs verrous existent : les premiers sont sociétaux, comme les incitations au recyclage par des mesures (inter)gouvernementales et des taxes carbone, et la mise en place de filières. Les seconds sont industriels : les aspects de démontabilité, récupérabilité puis *in fine* recyclage sont parfois extrêmement complexes, car l'aspect « multimatériaux » des objets mène parfois à un mélange duquel les alliages sont difficilement extractibles (Olivetti & Cullen, 2018). Une fois que les matériaux se retrouvent broyés et séparés sur une chaîne de tri, les ferrailles métalliques peuvent être mises de côté par magnétisme, grâce à un aimant, et les alliages non magnétiques peuvent être séparés des matériaux non métalliques grâce aux courants de Foucault. Cependant, ce tri n'est pas toujours suffisant pour séparer les différentes nuances d'alliages, et leur mélange mènerait à une pollution délétère de certains éléments. Ainsi, par exemple, les aluminiums des séries 2xxx contiennent du Cu, qui est ajouté afin d'augmenter leur résistance mécanique. Mais le Cu est un élément indésirable pour d'autres alliages d'aluminium, car il les rendrait moins ductiles, plus sensibles à la corrosion et ferait précipiter des phases non désirées, changeant de ce fait les propriétés mécaniques du matériau. Le tri « fin » des alliages doit donc être effectué, et des technologies fondées sur des analyses laser ou rayons X ont été mises en place pour les séparer (Gaustad et al., 2012). Cependant, ce tri reste complexe et imparfait, ce qui peut mener à des problèmes de contaminations.

Enfin, des enjeux scientifiques ont été identifiés, et seront abordés plus en détail dans la suite. Le premier est de développer de nouvelles méthodes de recyclage, afin de diminuer la consommation en énergie. Le second est la conception d'alliages orientée pour le recyclage.

Alerte / Enjeu N°1 : développer de nouvelles méthodes de recyclage, moins consommatrice en énergie.

La production de produits finis métalliques induit une production importante de chutes, qui sont sous forme de copeaux ou de poudres. Ainsi, les pertes sont de l'ordre de 40 % et plus de 80 % respectivement pour l'aluminium (Milford et al., 2011) et le titane¹. Actuellement, une grande partie de ces chutes est recyclée par re-fusion (Figure 1, en bleu). Ce recyclage est déjà positif mais il faut malgré tout souligner que l'étape de re-fusion est très consommatrice en énergie. Il est donc primordial de développer de nouvelles méthodes de recyclage, tel que le recyclage par voie solide. Cette méthode consiste à compacter directement les copeaux sous forme solide par des procédés tels que l'extrusion ou le frittage (Figure 1, en vert). Au niveau académique, des propriétés mécaniques équivalentes à celles des alliages obtenus par la voie de recyclage classique ont été reportées plusieurs fois (Haase & Tekkaya, 2015; Tekkaya et al., 2009)

¹ Discussion Y. Millet, responsable R&D, TIMET (Titanium Metals Corporation)

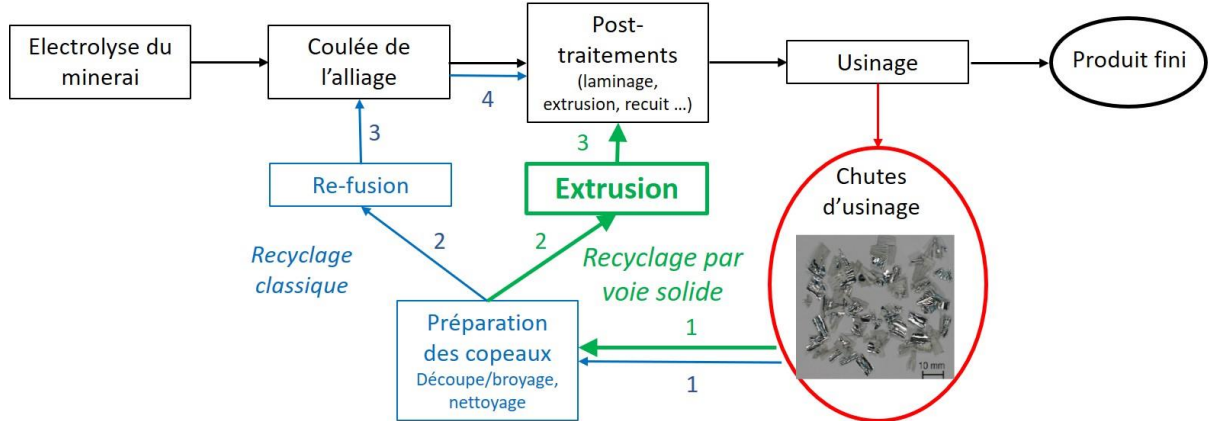


Figure 1 : Schéma présentant les étapes d'élaboration d'un alliage d'aluminium (noir), la méthode classique de recyclage (bleu) et la nouvelle méthode, soit le recyclage par voie solide (vert) pour les chutes d'usinage.

Le titane et l'aluminium semblent de bons candidats pour lancer cette nouvelle méthode car ils ont une forte valeur ajoutée et il est donc plus probable qu'un intérêt économique s'ajoutera à l'intérêt environnemental. A terme, cette méthode pourra être développée pour tous les types de métaux et alliages.

Les principaux intérêts du recyclage par voie solide par rapport au recyclage classique sont les suivants :

- Diminution de la consommation d'énergie et donc de l'impact environnemental du procédé grâce à une diminution du nombre d'étapes et surtout la suppression de l'étape de re-fusion (Duflou et al., 2015),
- Augmentation de la quantité d'alliages recyclables. En effet, les copeaux très fins et les poudres pourront être recyclés et la perte de matière oxydée sera limitée (elle représente 20 % pour les alliages d'Al avec le recyclage classique (Gronostajski & Matuszak, 1999)).
- Activités localisables sur le site de fabrication des produits finis et donc en France et en Europe. En effet, les équipements nécessaires pour le recyclage par voie solide sont moins lourds que ceux pour le recyclage classique. Il y a donc un intérêt économique (création de nouveaux emplois locaux) et écologique (diminution du transport de matière).
- Aide à la prise de conscience au niveau industriel du potentiel de valorisation des déchets métalliques. En effet, une volonté de développer un nouveau procédé de recyclage des matériaux métalliques montre le dynamisme et donc l'intérêt de cette filière et du recyclage en général.

Recommandations/ Propositions

Il a déjà été démontré au niveau académique que le recyclage par voie solide des chutes métalliques était réalisable et prometteur. Avant l'industrialisation, d'autres projets de recherche, en partenariat entre équipes de recherche académiques et industrielles, sont nécessaires. Tout d'abord, il faut valider le fait que les produits obtenus par recyclage par voie solide présentent les propriétés d'usage souhaitées. Certaines, telles que la ténacité ou la

résistance à la corrosion, n'ont pas encore été testées. Il faut également décrire précisément l'effet des contaminations de surface qui sont inévitables sur les chutes (avec en particulier l'oxydation). On pourra ainsi déduire des valeurs seuils acceptables et des spécifications selon les applications. Il faut également évaluer l'intérêt économique en comparant les investissements nécessaires en équipements par rapport au gain en consommation d'énergie et en coûts de transport. Cet aspect montrera si des incitations institutionnelles pourraient être un levier d'action pertinent. Globalement, ces projets permettront de générer une confiance des industriels face à ce nouveau procédé.

Alerte / Enjeu N°2 : Orienter la conception d'alliage pour faciliter le recyclage

La conception d'alliage joue un rôle crucial dans les processus d'économies d'énergie et de diminution des gaz à effets de serre. En effet, proposer des matériaux plus résistants permet de réduire les quantités d'alliages nécessaires, d'élargir les gammes d'utilisation (température, milieu corrosif...), d'alléger les structures ce qui a systématiquement pour conséquence de diminuer les quantités d'énergies nécessaires (conséquences directes ou indirectes) et les émissions de CO₂. De plus, en retardant la rupture des matériaux, on allonge leur durée de vie en service, et on diminue la consommation de matériaux due à un renouvellement trop rapide.

L'amélioration des propriétés des alliages, par des ajustements de compositions et de microstructure, est donc une thématique primordiale. Cependant, considérant que cet aspect est déjà l'objectif premier des recherches en métallurgie, il ne sera pas abordé ici, afin de se concentrer sur l'aspect du recyclage.

Le recyclage des alliages soulève plusieurs questions, et deux propositions sont détaillées dans la suite. Tout d'abord, la multiplicité des cycles de recyclage peut mener à un enrichissement en impuretés. Ces dernières sont aujourd'hui principalement diluées par ajout de métal primaire (issu du minerai), mais ceci implique d'utiliser de nouveau des métaux purs, et donc de s'appuyer sur des étapes d'extraction des minerais, très énergivores. Des recherches doivent donc être soutenues pour mieux comprendre le rôle de ces impuretés, comment les appréhender voire les mettre à contribution, et proposer des palliatifs.

Il est ensuite nécessaire de s'interroger sur la tendance d'ajouter un nombre croissant d'éléments d'alliages. Un exemple représentatif est celui des superalliages base nickel, auquel plus de 10 éléments peuvent être ajoutés. Ceci se justifie par l'amélioration des propriétés de l'alliage : les pièces restent en service plus longtemps, et grâce à un fonctionnement possible à plus haute température, des économies d'énergie sont faites. Cependant, il est souvent difficile de récupérer les éléments d'alliages d'un matériau, ce qui peut interroger sur les bénéfices finaux d'une telle opération, dans l'hypothèse où elle mène à la perte de métaux critiques. Une démarche visant à simplifier les compositions, jusqu'à établir des compositions « universelles » peut donc être proposée.

Proposition 1 : Appuyer les recherches sur l'impact des impuretés et sur de possibles moyens de les contrer

Les alliages tirent leurs propriétés de leur composition et de leur microstructure, l'une et l'autre étant liées. Une modification de la composition, même faible, peut avoir des effets désastreux sur le matériau final. Or, les cycles de recyclage sont propices à l'augmentation d'éléments d'alliages parfois indésirables.

Une étude pilote intitulée « le cycle du fer » s'est penchée sur les effets du cuivre comme impureté dans le fer (Birat, J.-P. & Zaoui, A., 2002). D'après certaines études, la contamination des aciers par le cuivre pourrait représenter, en 2050, près de la moitié des ferrailles (plaques) du domaine de l'automobile, qui ne pourraient donc plus être recyclées pour les mêmes applications et perdraient de la valeur (« down-cycling ») (Hatayama et al., 2014). Il est donc primordial de mieux appréhender cette pollution. L'étude pilote a permis d'établir une base de connaissances fondamentales sur les conséquences de teneurs en cuivre croissantes, et, finalement de redéfinir les valeurs critiques utilisées jusque-là comme seuil de tolérance pour les aciers. Surtout, elle propose une approche qui peut être répliquée pour l'étude d'autres impuretés dans les alliages.

Des études similaires peuvent être envisagées pour d'autres systèmes, tels que le fer comme impureté dans les alliages d'aluminium, ou l'oxygène dans les alliages de titane (Belov et al., 2002; Veronesi et al., 2013). Les filières de recyclage pour les grandes familles d'alliages commerciaux (aciers et alliages d'aluminium) étant relativement établies, bien que toujours perfectibles, il serait également intéressant de se pencher sur l'étude de systèmes plus spécialisés, comme les alliages de titane ou de nickel, pour lesquels le recyclage est moins habituel, afin de proposer des pistes de solutions. Caractériser de manière systématique l'impact des impuretés sur les réponses des alliages sous sollicitation est donc nécessaire pour accéder à une compréhension fine de leur rôle, et ceci passe par des approches fondamentales considérant des concentrations croissantes, éventuellement dans des alliages modèles. Ceci permettra non seulement de proposer un affinement des seuils critiques d'utilisation, mais pourrait aussi suggérer des approches plus novatrices de traitement des impuretés².

En effet, comme suggéré par le rapport conclusif de l'étude sur le cycle du fer, considérer les impuretés non comme des éléments problématiques à enlever de la matrice ou faisant perdre de la valeur au matériau mais comme des éléments d'addition désirables, permet d'apporter un regard nouveau sur cette problématique. Sous réserve d'une compréhension poussée permettant de maîtriser l'impact de ces éléments habituellement considérés comme indésirables, des stratégies visant à exploiter les capacités de l'alliage plus chargé en impuretés peuvent être mises en place. Ceci permettrait non seulement de garder ces matériaux en utilisation et de valoriser des stocks de matières premières « trop polluées », mais également de conserver la valeur des éléments d'alliage, qui ne seraient plus « perdus ».

Enfin, l'étude et la meilleure compréhension de possibles éléments « neutralisateurs » ou « équilibrants », à l'instar de Mn ou de Ni qui, ajoutés aux alliages d'aluminium, permettent

² Voir, par exemple, des solutions fondamentales visant à accommoder de grandes teneurs en fer dans des alliages d'aluminium : (Basak & Hari Babu, 2016)

de neutraliser les effets négatifs du fer (formation de précipités aciculaires α) (Basak et al., 2019; Shabestari, 2004) doit être poursuivie pour bénéficier d'une gamme de leviers sur lesquels jouer lors de la production d'un alliage à partir de matières premières secondaires qui n'aurait pas la composition exacte recherchée. On aura ainsi une alternative à la dilution.

Proposition 2 : Définir des paramètres pour guider la conception d'alliages

Lors de leur mise en solution, les éléments d'alliages deviennent, pour un grand nombre d'entre eux, difficilement récupérables, comme illustré dans le tableau ci-dessous (Cann et al., 2020; Gaustad et al., 2012). Les cases vertes correspondent aux éléments qui peuvent être récupérés en une étape, les jaunes aux éléments qui ne peuvent pas être récupérés mais ne détériorent pas les propriétés du matériau. Finalement, les cases rouges sont celles qui sont le plus problématiques, car les éléments ne sont pas récupérés, et peuvent également être délétères pour les propriétés de l'alliage. Considérant le coût de production de ces éléments, il apparaît nécessaire d'éviter que ces derniers puissent être « perdus », et qu'ils impactent de manière négative l'alliage recyclé.

	Extractive metallurgical processes			
	Iron/Steel	Aluminum	Copper	Zinc/Lead
Ag, Au, Pt	Red	Red	Green	Green
Al	Yellow	Grey	Yellow	Yellow
Bi, Cd	Red	Yellow	Green	Green
Co, Ga, Mo, Ni, Ta	Yellow	Yellow	Green	Green
Cr	Yellow	Red	Yellow	Yellow
Cu	Red	Yellow	Grey	Green
Mg, Mn, Y, Nb, Ti, V, W	Green	Yellow	Green	Green
Pd	Red	Red	Green	Yellow
Sc, Rare earth, Hf, Zr	Red	Red	Red	Green
Zn	Yellow	Yellow	Green	Grey

Figure 2: possibilité d'extraire un métal d'un alliage. Vert : extraction possible. Jaune : extraction complexe mais l'élément n'est pas nuisible à l'alliage. Rouge : extraction impossible et l'élément est nuisible à l'alliage. (Cann et al., 2020)

Ainsi, des lignes directrices de conception d'alliage pourraient être établies sur la base de la séparation des éléments (Nakajima et al., 2010), lorsque le matériau, après plusieurs cycles de recyclage, est en fin de vie et n'est plus utilisé. Ainsi, les différents éléments le constituant peuvent être récupérés, et utilisés de nouveau dans d'autres alliages. En complément de cette approche, la limitation du nombre d'éléments d'alliages différents utilisés dans un même matériau est une piste de réflexion, car ceci permettrait de réduire le nombre d'étapes finales d'extraction des éléments.

Une autre approche de conception d'alliage visant à simplifier les gammes de compositions a également été récemment proposée, sous le concept d'alliages « universels » (Miller et al., 2000). Ceci permettrait de simplifier leur recyclage, puisque de plus gros volumes de matériaux sont disponibles. Ainsi, l'obtention de combinaisons de propriétés désirables au sein d'un même alliage permet d'étendre son champ d'applications, en remplaçant des matériaux actuels. Par exemple, certains alliages d'aluminium des séries 6xxx ont maintenant une résistance mécanique comparable aux 7xxx : leur utilisation en remplacement des 7xxx dans les voitures permettrait de travailler avec moins de compositions, et donc d'optimiser

leur tri lors du démontage des voitures. Ces stratégies encore nouvelles qui dégageraient quelques grandes familles d'alliages « universelles » qui domineraient le marché, et pourraient être recyclées en circuit fermé, se heurtent cependant à des attentes en termes de performances pour certaines pièces. Malgré tout, guider le développement d'alliages qui répondraient, dans un produit manufacturé, à plusieurs fonctions, permettra définitivement de simplifier son recyclage.

Les trois axes présentés ici, de choix des éléments d'alliages en fonction de leur capacité à être finalement extraits de l'alliage, de réduction du nombre d'éléments d'alliages, et de réduction et uniformisation des nuances utilisées – principalement au sein d'un même produit – sont quelques approches qui peuvent être prises en compte pour la conception de futurs alliages. Bien qu'elles puissent sembler ne pas aller dans la même direction que la proposition 1 de ce second enjeu, l'ensemble de ces réflexions reste à poursuivre, puisqu'elles peuvent toutes se révéler plus ou moins adaptées dans des cas particuliers, selon les spécificités des matériaux.

Références :

- 2030 climate & energy framework (European Commission). (n.d.).
https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2012). *Sustainable materials: with both eyes open*. UIT Cambridge.
- Basak, C. B., & Hari Babu, N. (2016). Morphological changes and segregation of β -Al₉Fe₂Si₂ phase: A perspective from better recyclability of cast Al-Si alloys. *Materials & Design*, 108, 277–288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.096>
- Basak, C. B., Meduri, A., & Hari Babu, N. (2019). Influence of Ni in high Fe containing recyclable Al-Si cast alloys. *Materials & Design*, 182, 108017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108017>
- Belov, N., Aksenov, A., & Eskin, D. (2002). *Iron in Aluminium Alloys* (L. C. Press (Ed.)). <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482265019>
- Birat, J.-P., & Zaoui, A. (2002). The “Cycle of Iron.” *Rev. Met. Paris*, 99(10), 795–807. <https://doi.org/10.1051/metal:2002141>
- Cann, J. L., De Luca, A., Dunand, D. C., Dye, D., Miracle, D. B., Oh, H. S., Olivetti, E. A., Pollock, T. M., Poole, W. J., Yang, R., & Tasan, C. C. (2020). Sustainability through alloy design: Challenges and opportunities. *Progress in Materials Science*, 100722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100722>
- Choate, W. T., & Green, J. A. S. (2004). *Modeling the impact of secondary recovery (recycling) on U.S. aluminum supply and nominal energy requirements* (Minerals Metals & Materials Society (Ed.); pp. 913–918). Light Metals.
- Duflou, J. R., Tekkaya, A. E., Haase, M., Welo, T., Vanmeensel, K., Kellens, K., Dewulf, W., & Paraskevas, D. (2015). Environmental assessment of solid state recycling routes for

- aluminium alloys: Can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling? *CIRP Annals*, 64(1), 37–40.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.051>
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2012). Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 79–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.010>
- Gronostajski, J., & Matuszak, A. (1999). The recycling of metals by plastic deformation: an example of recycling of aluminium and its alloys chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93, 35–41. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00166-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00166-1)
- Haase, M., & Tekkaya, A. E. (2015). Cold extrusion of hot extruded aluminum chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 356–367.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.028>
- Hatayama, H., Daigo, I., & Tahara, K. (2014). Tracking effective measures for closed-loop recycling of automobile steel in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 65–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.006>
- Milford, R. L., Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2011). Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO2 abatement in the steel and aluminium sectors. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12), 1185–1195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.021>
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37–49.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X)
- Nakajima, K., Takeda, O., Miki, T., Matsubae, K., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2010). Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling. *Environmental Science & Technology*, 44(14), 5594–5600.
<https://doi.org/10.1021/es9038769>
- Olivetti, E. A., & Cullen, J. M. (2018). Toward a sustainable materials system. *Science*, 360(6396), 1396–1398. <https://doi.org/10.1126/science.aat6821>
- Raabe, D., Tasan, C. C., & Olivetti, E. A. (2019). Strategies for improving the sustainability of structural metals. *Nature*, 575(7781), 64–74. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1702-5>
- Shabestari, S. G. (2004). The effect of iron and manganese on the formation of intermetallic compounds in aluminum–silicon alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 383(2), 289–298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.06.022>
- Tekkaya, A. E., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N., & Pantke, K. (2009). Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3343–3350.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.047>
- Veronesi, P., Gaiani, S., Colombini, E., Poli, G., & Tisu, R. (2013). Recycling of alpha-titanium

technological scrap for exhaust system parts manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 53, 332–340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.043>

Zhang, Y., Sun, M., Hong, J., Han, X., He, J., Shi, W., & Li, X. (2016). Environmental footprint of aluminum production in China. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1242–1251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.137>