



Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein
Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

② FASCICULE DU BREVET A5

⑪

643 472

②1 Numéro de la demande: 8068/80

⑦3 Titulaire(s):
Precision Metalsmiths, Inc., Cleveland/OH (US)

②2 Date de dépôt: 30.10.1980

⑦2 Inventeur(s):
Robert A. Horton, Chesterland/OH (US)

②4 Brevet délivré le: 15.06.1984

⑦4 Mandataire:
Jean Hunziker, Zürich

④5 Fascicule du brevet
publié le: 15.06.1984

⑤4 Procédé de réalisation d'un moule carapace réfractaire de céramique et moule obtenu selon ce procédé.

⑤7 Le modèle est immergé dans une pâte pour former un revêtement. La pâte se compose d'un liant liquide dans lequel est suspendue une poudre réfractaire qui contient entre 20 et 100% d'alumine hydratée. Le revêtement est saupoudré de grains réfractaires alors qu'il est humide et ce revêtement saupoudré est ensuite séché.

REVENDICATIONS

1. Procédé de réalisation d'un moule-carapace réfractaire de céramique par phases répétées consistant à immerger un modèle dans une pâte pour former un revêtement, la pâte consistant en un liant liquide et en une poudre réfractaire, à saupoudrer le revêtement de grains réfractaires alors qu'il est humide et à sécher le revêtement saupoudré, caractérisé en ce que la teneur en poudre réfractaire de la pâte utilisée pour au moins certains des revêtements consiste au moins en partie en alumine hydratée.

2. Moule réfractaire obtenu selon le procédé de la revendication 1.

3. Moule selon la revendication 2, caractérisé en ce que la matière réfractaire contient entre 20 et 100% en poids d'alumine hydratée.

4. Pâte pour la mise en œuvre du procédé de la revendication 1, se composant d'une suspension de la poudre réfractaire dans le liant liquide, caractérisée en ce que ladite poudre réfractaire consiste au moins en partie en alumine hydratée.

La présente invention se rapporte à un procédé de réalisation d'un moule-carapace réfractaire de céramique par phases répétées consistant à immerger un modèle dans une pâte pour former un revêtement, la pâte consistant en un liant liquide et en une poudre réfractaire, à saupoudrer le revêtement de grains réfractaires alors qu'il est humide et à sécher le revêtement saupoudré.

Les moules-carapaces de céramique se réalisent en superposant des couches de matière réfractaire autour de modèles perdus qui sont enlevés des moules par la suite. Les modèles sont des reproductions des pièces devant être coulées en métal et sont formés d'une matière pouvant être éliminée après usage, par exemple de cire ou d'une résine synthétique convenable ou d'un mélange de cire et de résine. Les modèles sont reliés à un système de jets de coulée comprenant un support central ou une descente de coulée de manière à former un assemblage généralement dénommé montage ou arbre. La formation du moule-carapace autour du montage ou de l'arbre s'effectue en général par dépôt d'un enduit formé d'une pâte réfractaire de viscosité réglée, puis par assèchement directionnel de façon à revêtir complètement les modèles. Après évacuation de l'excès de pâte de l'arbre, le revêtement formé de cette pâte est sablé ou recouvert de stuc, alors qu'il est humide, le revêtement étant formé de matières réfractaires à granulométrie plus grossière. Cette couche est durcie, par exemple par séchage à l'aide d'un courant d'air forcé à la température ambiante. Le résultat consiste en une couche de matière céramique contenant des particules réfractaires enrobées à la surface. Lorsque la première couche de céramique est suffisamment dure et sèche, les phases de revêtement, d'enlèvement de l'excès de matière de revêtement, de dépôt de stuc et de séchage sont répétées jusqu'à ce qu'une carapace réfractaire ayant une épaisseur suffisante pour résister aux contraintes apparaissant au cours des opérations suivantes ait été réalisée autour de l'arbre. Au cours d'une opération suivante d'enlèvement du modèle, l'arbre qui supporte les modèles est enlevé du moule-carapace et celui-ci est préparé pour l'opération de coulée par cuisson à température élevée, par exemple de 1000°C.

La pâte réfractaire utilisée pour enduire par immersion et revêtir les modèles se compose en général d'une poudre réfractaire et d'un liant. Le liant est, par exemple, soit une solution colloïdale aqueuse de silice, soit du silicate d'éthyle hydrolysé. Les poudres réfractaires généralement utilisées comprennent de la silice, du zircon, de la zircone, de l'alumine, du zirconate de calcium, différents silicates d'aluminium et analogues qui sont fondus et cristallins. La matière de revêtement par un stuc a en général une granulométrie plus grande que celle de la poudre réfractaire utilisée dans la pâte. Les matières réfractaires utilisées par exemple pour le revêtement par un

stuc consistent en zircon granulaire, en silice fondu, en silice, en différents silicates d'aluminium et analogues.

Des opérations effectuées après coulée et consistant à enlever la matière frittée ou fondu du moule de la pièce de métal dont la coulée est achevée ont soulevé depuis longtemps des problèmes dans l'industrie du moulage à la cire perdue, et un intérêt considérable a été porté à la mise au point d'un moule dit mou qui serait capable d'apporter une solution à ces problèmes. L'usage courant consiste en général à soumettre les pièces coulées à une opération d'extraction par des chocs, opération au cours de laquelle un marteau pneumatique est utilisé pour enlever autant de matière du moule que possible. Lorsqu'il n'est pas possible d'enlever toute la matière du moule par l'opération d'extraction par des chocs, les pièces coulées sont soumises à un bain de sel fondu à une température d'environ 15 510°C ou supérieure.

L'utilisation d'un bain de sel fondu pour éliminer la matière frittée ou fondu du moule des pièces coulées représente une opération qui est tout particulièrement inopportun. Les températures élevées qui sont nécessaires et la nature caustique du sel fondu rendent l'opération difficile et désagréable et, de plus, impliquant des risques. Par ailleurs, le bain doit être nettoyé et reconstitué à intervalles de temps réguliers, ce qui élève encore les frais de l'opération. L'élimination des matériaux usés soulève un problème sérieux car il en résulte une dégradation de l'environnement, et il faut tenir compte de la réglementation. Les pièces coulées qui ont été soumises à un bain de sel fondu ont une apparence rouillée qui est gênante et il faut souvent les nettoyer à l'aide de produits chimiques et par des jets de sable.

L'invention vise la réalisation d'un procédé de production de moules-carapaces de céramique qui peuvent être enlevés des pièces coulées achevées plus facilement que ceux de l'art antérieur et permettant d'obtenir des moules-carapaces de céramique qui peuvent avoir toute résistance mécanique souhaitée après cuisson dans une large plage et qui sont, de plus, caractérisés par une grande perméabilité.

A cet effet, le procédé selon l'invention est caractérisé en ce que la teneur en poudre réfractaire de la pâte utilisée pour au moins certains des revêtements consiste au moins en partie en alumine hydratée.

Pour la mise en œuvre de ce procédé, l'invention prévoit une pâte se composant d'une suspension de la poudre réfractaire dans le liant liquide, caractérisée en ce que ladite poudre réfractaire consiste au moins en partie en alumine hydratée.

Il a été découvert qu'il est possible de produire des moules-carapaces de céramique mous ayant des aptitudes supérieures inattendues d'extraction par des chocs par remplacement par de l'alumine hydratée (de l'hydroxyde d'aluminium) de la totalité ou d'une partie des silices ou autres poudres réfractaires généralement utilisées pour la formulation des pâtes de production des moules-carapaces de céramique. Des pâtes contenant de l'alumine hydratée permettent de réaliser des moules-carapaces qui peuvent être facilement enlevés des pièces coulées même lorsqu'ils sont petits et très rapprochés les uns des autres, de telle sorte que les espaces séparant les pièces coulées sont remplis de la matière des moules qui est étroitement tassée.

Dans certains cas, la matière des moules peut être enlevée des pièces coulées par un marteau pneumatique ou par une autre opération de nettoyage ne faisant pas appel à un traitement par un bain de sel. Même lorsqu'il est nécessaire de procéder à un traitement par un bain de sel, par exemple lorsque les pièces coulées comportent des

fentes, ouvertures ou trous étroits, la charge imposée au bain est fortement réduite, car une quantité plus grande de la matière des moules a été enlevée par les opérations préliminaires d'extraction par les chocs que lorsqu'il s'agit de moules réalisés de manière classique. La quantité de sel est réduite, comme l'est la durée du traitement par le bain, et le problème concomitant d'évacuation des déchets prend moins d'importance.

La pâte selon l'invention permet aussi la mise en œuvre d'opérations de nettoyage qui sont différentes du traitement par un bain de

sel. Par exemple, la matière molle de la carapace peut être enlevée par un jet d'eau à basse pression, par exemple à une pression d'environ $70 \cdot 10^5$ Pa, qui est bien inférieure aux pressions de $700 \cdot 10^5$ Pa, ou même supérieures, qui sont nécessaires pour enlever les carapaces en matière selon l'art antérieur. La pâte est suffisamment molle pour qu'elle puisse être enlevée à la main, à l'aide d'un outillage convenable, de trous et analogues dans lesquels elle forme des noyaux. Il est aussi possible d'enlever la matière par les produits chimiques ou par des jets de sable pour tirer avantage du traitement en vrac.

Cette pâte a aussi d'excellentes caractéristiques d'enduction par immersion et d'élimination de l'excès ou d'assèchement. Une matière réfractaire à base d'alumine hydratée autorise, par ailleurs, un choix vaste de liants et de matières de revêtement en stuc qui doivent être utilisés pour la fabrication de moules-carapaces. Des quantités mineures d'agents mouillants et d'agents antimousses peuvent facultativement être introduites dans la composition, suivant l'usage courant.

L'invention a en outre pour objet un moule obtenu selon le procédé de l'invention.

La résistance après cuisson d'un moule ainsi réalisé peut varier dans une large plage par le choix de la quantité d'alumine hydratée qui est utilisée pour la formulation de la pâte. La résistance mécanique du moule après cuisson peut être réduite progressivement et de manière réglée par simple diminution très faible de la résistance à l'état vert en augmentant la teneur en alumine hydratée.

Suivant une réalisation préférée du moule selon l'invention, la matière réfractaire contient entre 20 et 100% en poids d'alumine hydratée.

Il est possible de réaliser des moules ayant des résistances mécaniques après cuisson qui sont approximativement égales ou qui ne sont que légèrement supérieures aux résistances mécaniques à l'état vert à l'aide de poudre réfractaire qui consiste pour environ 20% en poids en alumine hydratée. Lorsque la teneur en alumine hydratée descend au-dessous de 20%, la résistance mécanique après cuisson augmente et approche de celle d'un moule préparé à l'aide de 100% des matières réfractaires utilisées classiquement. Lorsque la matière réfractaire consiste en totalité en alumine hydratée, la résistance mécanique après cuisson est inférieure à la moitié de celle de la résistance mécanique à l'état vert, de sorte que la carapace est très molle et peut être facilement enlevée des pièces coulées. Bien que la résistance mécanique soit très faible, elle convient dans certaines applications, en particulier lorsque les pièces coulées de métal sont susceptibles de rupture à chaud. La plage d'utilité du moule-carapace mou peut être étendue par augmentation de l'épaisseur de la cloison de la carapace ou par renfort de la carapace pendant la coulée à l'aide de matière réfractaire granulaire.

Une mise en œuvre importante et avantageuse d'un revêtement formant une carapace très faible et molle est rendue possible lorsque cette carapace est utilisée conjointement avec des revêtements plus résistants, de nature classique. Par exemple, des revêtements d'alumine hydratée peuvent alterner avec des revêtements classiques, ou il est possible de les utiliser pour les premiers revêtements, puis de les soumettre à cuisson avec des revêtements classiques, ou ils peuvent encore former une couche intermédiaire entre des revêtements classiques. Dans tous ces cas, la carapace tend à se fendre le long des revêtements faibles en hydroxyde d'aluminium pendant l'extraction par des chocs, les revêtements classiques plus résistants n'étant plus supportés et se cassant facilement en tombant des pièces coulées.

La résistance mécanique réduite après cuisson et l'aptitude améliorée à être extraits par des chocs qui caractérisent les moules-carapaces mous de l'invention peuvent être dues à une forte réduction de volume de l'alumine hydratée réfractaire pendant la cuisson. La perte calculée de volume à la phase solide lorsque l'alumine hydratée se décompose en oxyde d'aluminium est d'environ 60%. Cette perte de volume et la porosité qui en résulte s'ajoutent à la porosité normale qui apparaît à la suite de l'évaporation du véhicule liquide du liant. La porosité est répartie dans la totalité de la structure du

moule et peut se trouver entre les particules réfractaires ainsi qu'à l'intérieur de ces dernières lorsqu'une décomposition s'est produite.

Malgré la grande perte de volume à l'intérieur de la phase pulvérulente de matière réfractaire, les moules de l'invention réalisés à l'aide d'alumine hydratée ne subissent pas un retrait néfaste pendant la cuisson. Un fait ayant une aussi grande importance est que les métaux fondus, y compris l'acier, peuvent être coulés sur les surfaces fortement poreuses du moule en permettant néanmoins d'obtenir des pièces coulées ayant des surfaces unies. La porosité du moule non seulement réduit la résistance mécanique après cuisson, mais a de plus l'avantage de permettre d'évacuer facilement l'air et les gaz des cavités du moule pendant la coulée et de faciliter le remplissage de sections minces des pièces coulées en métal.

L'invention va être décrite plus en détail en regard des dessins annexés et dans les exemples nullement limitatifs qui vont suivre.

Sur les dessins:

— la fig. 1 est un graphique illustrant l'effet produit par la teneur en alumine hydratée sur les résistances mécaniques après cuisson et à l'état vert, et

— la fig. 2 est un graphique représentant la dilatation thermique d'échantillons de moules de céramique produits à l'aide d'une pâte classique se composant d'alumine calcinée et à l'aide d'une pâte selon l'invention dont la matière réfractaire contient 50% d'alumine hydratée.

Les exemples qui vont suivre permettront de bien comprendre la manière dont il s'agit de mettre en œuvre l'invention.

Exemple 1:

Une série d'essais est effectuée afin de montrer l'effet produit sur la résistance mécanique à l'état vert et la résistance mécanique après cuisson par le remplacement du zircon, qui est une matière réfractaire classiquement utilisée pour les carapaces de céramique, par de l'alumine hydratée. Huit compositions allant de 100% de Zircon à 100% d'alumine hydratée ont été soumises aux essais. Dans chaque cas, le même liant, les mêmes matières d'enduction par un stuc et différents revêtements ont été utilisés. Le liant a consisté en:

Silice colloïdale	1,35 kg
Agent mouillant	2 ml
Agent antimousses à base de silicones	14 ml

La silice colloïdale était sous la forme d'un sol aqueux stabilisé à l'aide d'approximativement 0,45% de Na_2O et contenait 30% de SiO_2 dont la granulométrie moyenne était de 8 μ . L'agent mouillant était du dioctylsulfosuccinate de sodium dilué à 75% dans un mélange d'eau et d'alcool et l'agent antimousses était une émulsion à 30% de silicone.

La granulométrie du zircon était telle qu'il passait par un tamis à 0,044 mm d'ouverture de maille. L'alumine hydratée avait une granulométrie moyenne de 6,5 à 8,5 μ et contenait en principe 0,01% de SiO_2 , 0,006% de Fe_2O_3 et 0,15% de Na_2O . La matière d'enduction par un stuc était du kaolin calciné contenant notamment 47,5% de Al_2O_3 et 49,3% de SiO_2 .

A chaque essai, la poudre réfractaire était additionnée au liant liquide et agitée de manière à être mise en suspension jusqu'à obtention d'une bonne consistance pour l'enduction par immersion. La pâte a été soumise ensuite à une dépression afin d'en enlever l'air entraîné. Six revêtements par enduction ont été effectués et chacun a été enduit de stuc, puis séché. Une matière d'enduction par un stuc formée de grains fins a été utilisée pour le premier revêtement, une matière à granulométrie médiane a été utilisée pour le second revêtement et une matière à gros grains a été utilisée pour les quatre derniers revêtements.

Les échantillons préparés par le procédé mentionné ci-dessus et contenant des quantités variables d'alumine hydratée ont été soumis à des essais afin de déterminer les résistances mécaniques à l'état vert ou avant cuisson et les résistances mécaniques après cuisson à 1000°C pendant 1 h. Les résultats sont portés sur le graphique de la fig. 1.

On observe, d'après la fig. 1, que le remplacement du zircon par de l'alumine hydratée a provoqué une forte réduction continue de la résistance mécanique après cuisson avec une faible diminution seulement de la résistance à l'état vert. Par exemple, le remplacement de 20% de zircon par de l'alumine hydratée a abaissé la résistance mécanique après cuisson d'environ 52,6% avec une faible diminution seulement de la résistance à l'état vert d'environ 8,6%. Le remplacement de zircon par de l'alumine hydratée dans des proportions de 20 à 100% a réduit la résistance mécanique après cuisson d'environ $37,8 \cdot 10^5$ à environ $9,1 \cdot 10^5$ Pa, soit d'environ 76%, tandis que la résistance mécanique à l'état vert a été réduite d'environ $32,9 \cdot 10^5$ à environ $21,7 \cdot 10^5$ Pa, soit d'environ 34%. La modification de la résistance mécanique à l'état vert avec des teneurs en alumine hydratée comprises entre 40 et 100% est négligeable.

Il est possible de régler la résistance mécanique après cuisson en faisant varier le pourcentage de l'alumine hydratée pour obtenir toute valeur choisie dans une plage allant presque de 1 à 9 et allant d'un extrême à une carapace faible et molle à l'autre extrême à une carapace ayant une résistance mécanique extrêmement élevée après cuisson. Les résistances mécaniques excessives après cuisson qui sont représentées par une teneur de 100% de zircon dans le graphique de la fig. 1 rendent difficile l'enlèvement de la matière de la carapace entre des pièces coulées étroitement rapprochées ou entre des cloisons étroitement rapprochées de la même pièce coulée pendant l'opération d'extraction par des chocs. Cette forte résistance mécanique accroît par ailleurs le risque de rupture à chaud d'alliages et de pièces coulées qui sont profilées et qui sont susceptibles d'être affectées de ce genre de défaut. Lorsque la matière réfractaire se compose en totalité d'alumine hydratée, la résistance mécanique après cuisson est inférieure à la moitié de la résistance mécanique à l'état vert et une carapace de ce type est très molle et peut être facilement enlevée des pièces coulées. La plage d'utilité d'une composition réfractaire consistant en 100% d'alumine hydratée peut être étendue par augmentation de l'épaisseur de la cloison de la carapace ou par un renfort de cette carapace pendant la coulée à l'aide de matières granulaires réfractaires ou à l'aide de revêtements de carapace molle conjointement avec des revêtements plus résistants et qui consistent en des compositions ayant des teneurs moindres en alumine hydratée.

D'après les essais reproduits sur la fig. 1, les compositions de revêtement contenant d'environ 20 à environ 100% d'alumine hydratée sont avantageux parce qu'il est très facile de régler la résistance mécanique après cuisson. Bien que des compositions contenant des quantités moindres d'alumine hydratée soient utiles, la variation rapide de la résistance mécanique après cuisson due à des teneurs inférieures à environ 20% d'alumine hydratée dans les pâtes rend difficile l'obtention d'une résistance mécanique souhaitée.

Exemple 2:

Une pâte pour carapace de céramique qui a été préparée contenait une poudre réfractaire se composant d'oxyde d'aluminium calciné, et cette préparation a été comparée à une seconde pâte dans laquelle de l'alumine hydratée a remplacé la moitié de l'alumine calcinée.

Le liant liquide utilisé dans la formulation de la pâte consistait en:

Silice colloïdale	2,25 kg
Agent mouillant	10 gouttes
Alcool octylque	10 ml

La silice colloïdale, l'agent mouillant et l'alumine hydratée étaient les mêmes que ceux utilisés dans l'exemple 1. L'alumine calcinée était du type α à grande pureté et passant au tamis à 0,044 mm d'ouverture de maille.

Le rapport de la matière réfractaire au liant liquide a été réglé de manière à obtenir une viscosité dans une plage de 1 à 1,05 Pa's (mesurée au viscosimètre de Brookfield, broche N° 3, 20 tr/min) pour chaque pâte. Un premier revêtement a été déposé à l'aide de

chaque pâte et enduit de stuc à l'aide de grains d'alumine fondue ayant une granulométrie de 0,47 mm et séchés à l'air. Les pâtes ont ensuite été diluées par addition d'une quantité supplémentaire de solutions de liants de manière à obtenir une viscosité de 0,75 à 0,775 Pa's, puis les seconds revêtements ont été déposés et enduits de stuc à l'aide de la même alumine fondue.

Les pâtes ont été davantage encore diluées de manière à obtenir une viscosité comprise dans une plage de 0,5 à 0,525 Pa's, puis quatre revêtements supplémentaires ont été déposés. Chaque revêtement a été enduit de stuc à l'aide d'alumine fondue d'une granulométrie de 0,67 mm, puis a été séché à l'air.

Les essais de résistance mécanique des échantillons ont été effectués avant cuisson et après cuisson à 1000°C pendant 2 h, cuisson suivie d'un refroidissement à la température ambiante. Les résultats sont énumérés dans le tableau suivant:

	Alumine calcinée	50% d'alumine calcinée 50% d'alumine hydratée
A l'état vert	$34,58 \cdot 10^5$ Pa	$25,3 \cdot 10^5$ Pa
Après cuisson	$124 \cdot 10^5$ Pa	$25,7 \cdot 10^5$ Pa

On observe d'après le tableau ci-dessus qu'une réduction considérable de la résistance mécanique après cuisson a été obtenue par remplacement de 50% de l'alumine calcinée par de l'alumine hydratée. Ce remplacement à 50% a abaissé la résistance mécanique après cuisson d'environ 79%. La résistance mécanique à l'état vert de l'échantillon d'alumine calcinée était très proche de celle de l'échantillon contenant 100% de zircon et décrit dans l'exemple 1. On observe également que le mélange de 50% d'alumine hydratée et de 50% d'alumine calcinée avait une résistance mécanique à l'état vert qui était très proche de celle du mélange de 50% d'alumine hydratée et de 50% de zircon qui a été décrit dans l'exemple 1. Comme dans le cas de l'exemple 1, le remplacement par de l'alumine hydratée de 50% de la matière réfractaire usuelle avait pour effet une réduction relativement faible de la résistance mécanique à l'état vert.

Exemple 3:

Les échantillons destinés aux essais de dilatation thermique ont été préparés à l'aide des mêmes pâtes et des mêmes procédés que ceux spécifiés dans l'exemple 2. Les résultats sont portés sur le graphique de la fig. 2. On observe que la courbe de dilatation thermique d'un échantillon préparé à l'aide de la pâte contenant un mélange de 50% d'alumine hydratée et de 50% d'alumine calcinée est très proche de la courbe de dilatation thermique de l'échantillon préparé à l'aide de la pâte contenant 100% d'alumine calcinée. Ces résultats montrent que la perte calculée de 60% de volume se produisant par décomposition de l'alumine hydratée a essentiellement pour conséquence de créer une porosité interne et non pas de provoquer le retrait du moule.

Exemple 4:

Une pâte préparée en vue de la fabrication d'une carapace de céramique consistait en:

Silice colloïdale	4,85 kg
Agent mouillant	13 ml
Agent antimousses à base de silicone	68 ml
Alumine hydratée	7,74 kg

La silice colloïdale était sous la forme d'un sol aqueux contenant en principe 30% de SiO_2 ayant une granulométrie moyenne de 12 μm et stabilisé à l'aide de sodium formant l'ion complémentaire et dont la surface est modifiée par des ions aluminate.

Une pâte a été préparée de manière classique. L'agent mouillant et l'agent antimousses ont été ajoutés à la silice colloïdale, puis l'alumine hydratée a été introduite sous agitation dans la suspension.

Une pâte très unie et ayant d'excellentes caractéristiques d'enduction par immersion et d'élimination de l'excédent a été obtenue.

La pâte a été utilisée pour réaliser un moule-carapace de céramique autour du montage supportant 126 modèles réalisés à l'aide d'un mélange de cire et de résine.

Sept revêtements de pâte ont été déposés par immersion. Chaque couche a été enduite de stuc à l'aide de particules réfractaires, puis séchée avant le dépôt du revêtement suivant. Les trois premiers revêtements ont été déposés sous vide et les quatre derniers revêtements ont été déposés sans application de dépression. Les particules d'enduction par un stuc qui ont été utilisées à chaque fois consistaient en une argile cuite pulvérisée à base d'alumine et de silice très généralement utilisée à cette fin dans l'industrie de moulage à la cire perdue. Les deux premiers revêtements ont été enduits de stuc à l'aide de grains fins, le troisième à l'aide d'une matière à granulométrie intermédiaire, et les quatre dernières à l'aide d'un stuc à gros grains, conformément à la pratique bien connue.

Lorsque les sept revêtements ont été déposés et séchés, l'arbre central a été enlevé du moule, puis celui-ci a été libéré de la cire dans un autoclave à la vapeur fonctionnant sous une pression de $7,7 \cdot 10^5$ Pa. Aucune fissure n'est apparue dans le moule pendant cette opération et l'examen de celui-ci a montré qu'il avait une bonne résistance mécanique à l'état vert qui permettait de le manipuler facilement.

Le moule a ensuite été soumis à cuissage à 1000°C pendant 1 h. Le noyau de sable lié par de la résine comportait un revêtement réfractaire mince à la surface extérieure et a été réchauffé à 120°C avant d'être placé à l'intérieur du moule, puis l'ensemble a été placé dans une chambre convenable de coulée pour recevoir le métal en fusion. La surface intérieure du moule et la surface extérieure du noyau ont été utilisées pour former un système creux consistant une descente de coulée et ayant une paroi d'une épaisseur de 6,35 mm.

Un vide partiel de $0,92 \cdot 10^5$ Pa a été produit dans la chambre de coulée afin de retenir le moule et le noyau en place et de contribuer à évacuer l'air de la cavité du moule pendant le déversement du métal en fusion. 6,3 kg d'acier faiblement allié (type SAE 6150) à une température de 1620°C a été déversé dans le moule dans lequel il a été laissé jusqu'à solidification.

Après refroidissement, le moule réfractaire a été enlevé facilement de la surface extérieure de la pièce coulée à l'aide d'un marteau pneumatique, malgré même le fait que les pièces coulées aient été placées à proximité immédiate les unes des autres suivant une disposition qui normalement rend difficile l'enlèvement de la matière du moule. Les pièces coulées particulières de cet exemple avaient un petit trou d'environ 4,75 mm de diamètre et de 6,35 mm de longueur. La matière du moule demeurant dans ces trous était suffisamment molle pour pouvoir être enlevée facilement avec un trombone redressé. Elle a pu aussi être facilement enlevée par projection de sable ou par projection d'eau à basse pression. Les pièces coulées résultantes avaient une surface unie et donnaient satisfaction à tous égards.

Exemple 5:

Une solution de liant a été préparée à l'aide des mêmes ingrédients que ceux mentionnés dans l'exemple 4, dans les proportions suivantes:

Silice colloïdale	0,68 kg
Agent mouillant	1 ml
Agent antimousses à base de silicone	3 ml

De l'hydroxyde d'aluminium à granulométrie fine de qualité pour laboratoire a été additionné au liant liquide, puis agité de manière à former une suspension jusqu'à ce que la viscosité obtenue soit de $1,4 \text{ Pa's}$.

Un montage de modèle se composant de deux petites pièces rapportées de moule placées sur une base de cire a été traité à l'aide de la pâte. La pâte a été mise sous vide afin d'en éliminer les bulles d'air, mais les revêtements individuels à l'aide de la pâte ont été ef-

fectués sans être mis sous vide. Les enductions de stuc qui ont été utilisées étaient les mêmes que celles indiquées dans l'exemple 1.

Un revêtement a été déposé, enduit de stuc à l'aide de fines particules de kaolin calciné, puis séché. La viscosité de la pâte a été ensuite abaissée à $0,8 \text{ Pa's}$ pour les deuxièmes et troisièmes revêtements. Une granulométrie intermédiaire de stuc a été utilisée pour le second revêtement et des gros grains ont été utilisés pour le troisième. La viscosité de la pâte a ensuite été encore réduite jusqu'à $0,6 \text{ Pa's}$, puis trois autres revêtements ont été déposés. Ces revêtements ont été enduits de stuc ou saupoudrés à l'aide de grosses particules de kaolin calciné.

Après séchage, la carapace a été placée dans un autoclave afin de faire fondre la matière du modèle. Elle a subi ensuite une cuisson à 870°C , puis a été refroidie à la température ambiante pour examen.

La carapace était très molle et il a été observé qu'elle avait une surface unie ne comportant aucune fissure.

Le moule a subi une nouvelle cuisson à 540°C , puis a été rempli d'un alliage d'aluminium à 730°C . Après refroidissement, la majeure partie du moule-carapace a été enlevée facilement à l'aide d'un marteau. La faible quantité de matière qui était restée a été enlevée à l'aide d'un jet d'eau à basse pression. Les pièces coulées d'aluminium avaient des surfaces unies et donnaient satisfaction à tous égards.

Au cours d'un autre essai, plusieurs pièces en matière de carapace qui avaient été enlevées des pièces coulées ont suivi une cuisson à 1620°C dans un four électrique, ont été maintenues pendant $4\frac{1}{2}$ h à cette température, puis refroidies dans le four. Il a été observé que les pièces étaient très molles malgré le fait qu'elles avaient subi une cuisson de durée prolongée à la même température que l'acier en fusion utilisé dans l'exemple 4. La matière pour carapace était suffisamment molle pour pouvoir être désagréée avec l'ongle ou par faible frottement sur une surface dure.

Exemple 6:

Un moule a été préparé à l'aide de la pâte et des stucs mentionnés dans l'exemple 4 conjointement avec des pâtes traditionnelles. Celles-ci ont été utilisées pour le premier revêtement et pour les deux revêtements extérieurs. Quatre revêtements formés d'une pâte d'alumine hydratée ont été interposés.

La pâte utilisée pour le premier revêtement consistait en:

Silice colloïdale	4,5 kg
Agent mouillant	13 ml
Agent antimousses	16 ml
Poudre réfractaire	10,1 kg

La poudre réfractaire consistait en 45% de zircon passant au tamis de 0,044 mm d'ouverture de maille, 15% de zircon d'une granulométrie d'environ $25 \mu\text{m}$ et 40% de silice fondue (100% - $74 \mu\text{m}$, 75% - $44 \mu\text{m}$). La pâte traditionnelle des deux revêtements extérieurs a consisté en:

Silice colloïdale	0,95 kg
Eau	0,45 kg
Agent antimousses	16 ml
Poudre réfractaire	8,6 kg

La poudre réfractaire consistait, pour 60%, en une poudre d'argile cuite pulvérisée (dont 90% passaient au tamis de 0,105 mm d'ouverture de maille et 50% passaient au tamis de 0,074 mm d'ouverture de maille) et, pour 40%, de silice fondue (dont 100% passaient au tamis de 0,149 mm d'ouverture de maille et 40% au tamis de 0,044 mm d'ouverture de maille).

Les montages de modèle utilisés pour réaliser le moule étaient du même type que ceux utilisés dans l'exemple 4, 260 modèles étant montés sur l'arbre central.

Les deux premiers revêtements ont été déposés sous vide et les autres sans application de vide. Une matière fine d'enduction par un stuc ou de saupoudrage a été utilisée pour le premier revêtement, un stuc de granulométrie intermédiaire a été saupoudré sur les

deuxième et troisième revêtements et le stuc à gros grains a été utilisé pour les autres revêtements. Les modèles ont été enlevés dans un autoclave, après quoi le moule a été chauffé à 870°C et placé autour d'un noyau de sable revêtu de matière réfractaire et lié à la résine, ce noyau ayant une température de 120°C. Le noyau coopérait avec le volume intérieur du moule pour former un système de descente de coulée ayant une épaisseur de paroi de 6,35 mm. Un vide partiel de $0,8 \cdot 10^5$ Pa a été créé dans la chambre de coulée sous vide afin de favoriser la coulée du métal en fusion. 14 kg de fonte de silicium ayant une température de 950°C ont été déversés dans les cavités du moule.

Après refroidissement, la matière de la carapace a été enlevée facilement à l'aide d'un marteau pneumatique. Les pièces coulées donnaient toute satisfaction.

Exemple 7:

L'avantage de l'utilisation de l'alumine hydratée pour réduire la résistance mécanique excessive après exposition à des températures élevées n'est pas limité aux compositions réfractaires préparées à l'aide de liants à base de silice, ce qui apparaîtra évident d'après ce qui suit:

Deux pâtes ont été préparées à l'aide d'un liant colloïdal à base de zircone. La formule du liant consistait en 500 ml de zircone colloïdale (22,5% de ZrO_2), 5 ml d'alcool octylque (agent antimousses) et 1 ml d'agent mouillant. La matière réfractaire que contenait une pâte était de l'alumine hydratée et celle de l'autre était de l'alumine calcinée (de l'alumine α de grande pureté). La viscosité de chaque pâte a été réglée dans la plage de 1 à 1,05 Pa·s. Des échantillons ont

été préparés par dépôt de cinq revêtements de chaque pâte et saupoudrage de chaque revêtement à l'aide d'un stuc formé d'alumine fondue (d'une granulométrie de 0,47 mm). Chaque revêtement saupoudré a été séché à l'air avant le dépôt du revêtement suivant.

5 Lorsque les échantillons ont été achevés et séchés, ils ont été soumis à cuisson à 1620°C, cette température étant équivalente à celle de l'acier en fusion, et ont été maintenus à cette température pendant 2 h. Des essais de détermination du module de rupture ont été effectués sur les échantillons après refroidissement et ont donné les résultats suivants:

Alumine calcinée	$189,6 \cdot 10^5$ Pa
Alumine hydratée	$9,66 \cdot 10^5$ Pa

On observe, d'après ce qui précède, que l'utilisation d'une matière réfractaire consistant en alumine hydratée ou hydroxyde d'aluminium permet de produire des moules-carapaces de céramique qui ont des résistances mécaniques après cuisson pouvant être réglées sélectivement à des niveaux bien inférieurs aux résistances mécaniques après cuisson des moules réalisés à l'aide des matières réfractaires traditionnelles. La forte réduction des résistances mécaniques après cuisson des moules selon l'invention facilite leur enlèvement des pièces dont la coulée est achevée et permet d'utiliser des opérations simplifiées et exécutées rapidement d'extraction par des chocs et de nettoyage. Les moules réalisés à l'aide d'alumine hydratée constituant la matière réfractaire minimisent les ruptures à chaud des pièces coulées qui y sont sujettes et ont une forte porosité qui minimise l'emprisonnement de l'air et des gaz dans les cavités des moules.

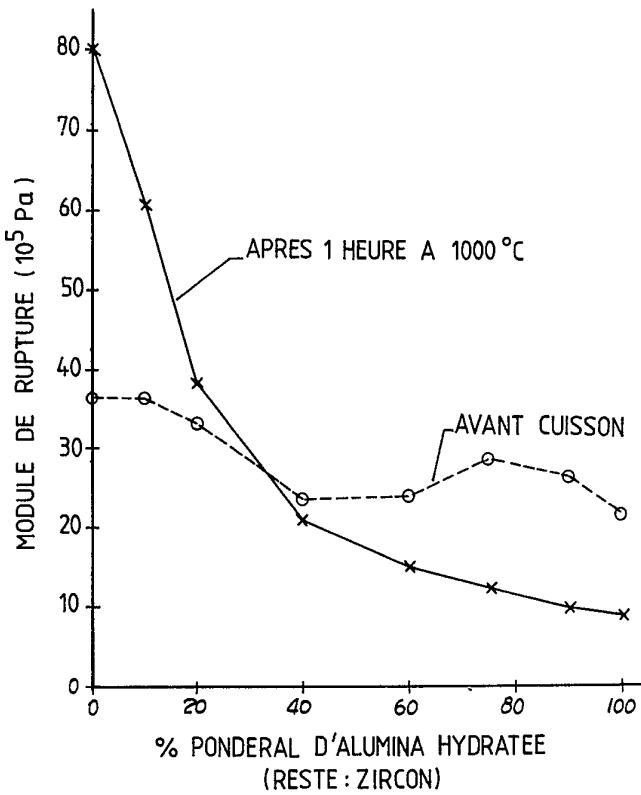


Fig. 1

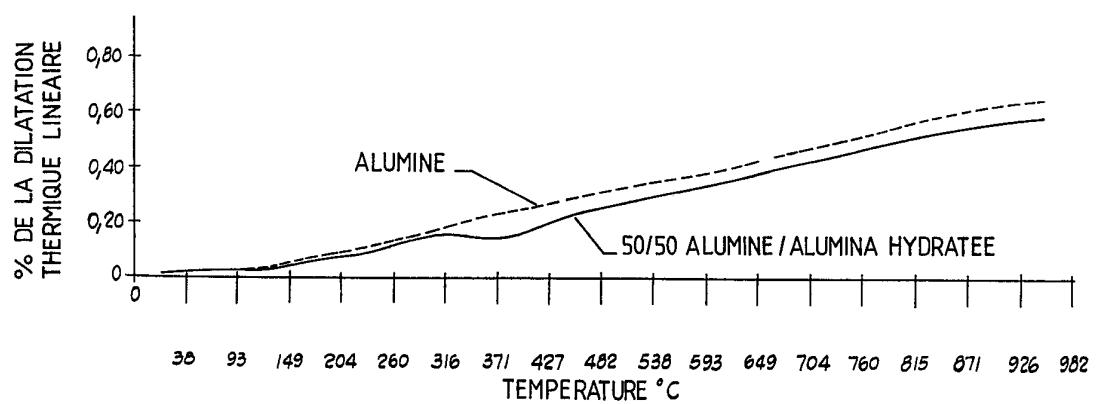


Fig. 2