Steigerung und Optimierung der Ausbringung bei Stahlgussteilen mit hoher Wertschöpfung

Bei der Fertigung von Stahlgussteilen gibt es zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten für eine Reihe von Materialien wie Manganstähle oder Nickelbasislegierungen, die sehr komplex sind und eine große Anzahl an kritischen Anforderungen aufweisen. Dieser Artikel konzentriert sich jedoch ausschließlich auf die Optimierung der Produktionsausbringung, die als das Verhältnis zwischen dem Gewicht des eigentlichen Gussteils und der Gesamtmenge des in die Form gegossenen Metalls definiert wird (Verhältnis Nettogewicht/Bruttogewicht = Ausbringungsrate).

Die meisten Unternehmen, die Stahlgusskomponenten fertigen, nutzen in unterschiedlichem Maße die Gießsimulationsprogramme, die derzeit auf dem Markt verfügbar sind. Lohnfertiger oder Hersteller von Kleinserien machen das Hauptsegment der Stahlgussindustrie aus. Die zuvor genannte Simulationssoftware kann von diesen Metallgießereien als Hilfsmittel herangezogen werden, um eine Gießsimulation der bestehenden Modelle bei geringem Risiko und niedrigen Kosten durchzuführen. Dabei kann die „herkömmliche Speisungstechnik" Optimierungsstrategien unterzogen werden, die hauptsächlich auf die Verbesserung der Gussausbringung zielen.

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit dem Namen „SUPERALLOY" ist die Basis für diese Abhandlung, in der die wichtigsten erreichten Ergebnisse veröffentlicht werden. Neue Speiserdesigns und -zusammensetzungen werden aufgezeigt und aktuelle Neuigkeiten zu Speisungssystemen der Zukunft werden vorgestellt.

Net/Gross yield optimization on high value added steel casting

The manufacturing of cast steel components presents numerous improvement opportunities in a whole range of materials, from manganese steels to nickel based alloys, with a high level of complexity and a large amount of critical requirements. Among all the possible advances, this paper focuses exclusively on the optimization of the production yield, defined as the ratio between the weight of the cast part itself and the total amount of metal poured into the mold (net weight/gross weight ratio = yield).

Most of the companies belonging to the cast steel component manufacturing sector have utilized, in different degrees, casting process simulation tools that are currently available in the market. Jobbing shops, or producers of short production runs, make up a key segment of the steel casting industry. The aforementioned simulation software can be used by these metal casters as a tool to provide a low risk and a low cost review of the existing patterns, in such a way that the "traditional design criteria" of the feeding systems can be submitted to optimization strategies, focusing mainly on yield.

The R&D Project named "SUPERALLOY" serves as basis for this paper, where the main achieved results are published, new feeder designs and compositions are proposed and the latest news regarding the feeding systems of the near future are presented.

Autoren:
Arkaitz Carrasco, IK4-Azterlan Metallurgical Research Centre, Durango, Spanien
David Peña. IK4-Azterlan Metallurgical Research Centre, Durango, Spanien
Guillermo Trillo, FONDESAL S.A., Rubí, Spanien
Jaime Prat, ASK Chemicals España S.A., Getxo, Spanien
Julián Izaga, IK4-Azterlan Metallurgical Research Centre, Durango, Spanien
Marcos Manzanares, FONDESAL S.A., Rubí, Spanien

Einführung

Die Gießtechnologien für Stahl und komplexe Legierungen weisen viele Besonderheiten auf, welche die Merkmale in Bezug auf Ausbringung und Produktivität beeinträchtigen, insbesondere im Vergleich zu anderen Gusswerkstoffen.

Bei der Untersuchung der besonderen Merkmale der Gussstahlkomponenten muss besonders auf die Speisungssysteme und metallurgischen Überlegungen geachtet werden, da sich hier wichtige Verbesserungsmöglichkeiten ergeben. Mit der Reduzierung der Speisergröße minimieren sich die thermischen Belastungen und folglich werden die metallurgischen Eigenschaften in angrenzenden Bereichen beträchtlich verbessert.

Der Ausbringung sollte nähere Beachtung geschenkt werden, da sich noch viele industrielle Anwendungen finden, in denen die Ausbringungsrate kaum 40 % erreicht (Bild 1).

Diese allgemeinen Überlegungen waren die Grundlage für die Versuchsführung und den Start des SUPERALLOY-Projekts. Herkömmliche Designkonzepte wurden kritisch geprüft, wobei besonderes Augenmerk auf die Kriterien Modul, Volumen und Speisungsweite gelegt wurde.

Dieses Projekt konzentriert sich somit auf den Herstellungsprozess von Gussstahlkomponenten, bei denen erhebliches Verbesserungspotential besteht, da hier eine Reihe von günstigen Umständen zusammentreffen. Die Detailbetrachtung dieser Komponenten und deren Produktionschargen - die oftmals klein sind oder gar Einzelanfertigungen – stellte oft ein Hindernis für alle weiteren Maßnahmen zur Verbesserung der Ausbringung dar. Grund hierfür ist die Befürchtung, die jeweilige Komponente dann nicht mehr „fehlerfrei" produzieren zu können".

In den Fällen, in denen Produkte in Marktnischen mit hohen technischen Anforderungen hergestellt werden, sind Simulationsprogramme eingesetzt, mit denen Designs validiert werden, damit Gießereien mit diesen neuen Designs fertigen können.

Im folgenden Artikel werden einige der neuen Berechnungskriterien vorgestellt und erörtert. Dabei wurde die Entwicklung von fortschrittlichen Speisungssystemen, bei denen das isolierende/exotherme Verhalten und das geometrische Design ausgewogen sind, besonders berücksichtigt.

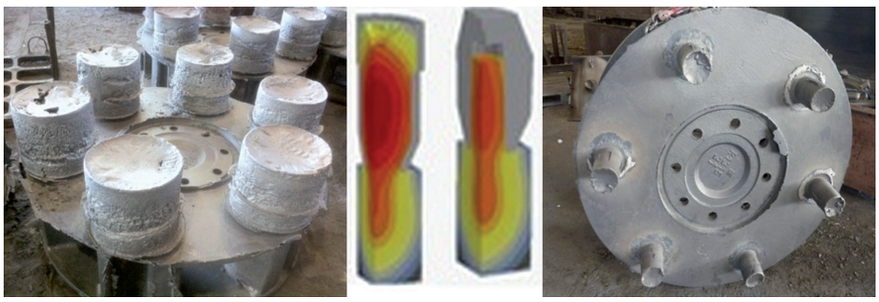


Bild 1: Beispiel für die Optimierung der Ausbringung

Versuchsanordnung

Die Versuchsarbeiten begannen mit der Prüfung und dem Vergleich der Berechnungs- und Entwurfsmethoden, die in einer repräsentativen Anzahl an Stahlgießereien angewendet wurden.

Aus diesen Ergebnissen wurde eine variable Matrix erstellt, bei der unterschiedliche Materialien (niedrig- und mittellegierte Stähle) zusammen aufgezeichnet wurden:

Manganstähle und Edelstähle, verschiedene Größen (klein: unter 25 kg, mittelgroß: 25 bis 150 kg und groß: bis zu 4.000 kg) sowie die Chargengrößen (Einzelteil- und Serienfertigung).

In allen Fällen ergab sich dasselbe Modell zur Annäherung an das Problem:

- Das Speiserdesign ist gut ausgearbeitet.
- Das Design des Eingusssystems wird nicht berücksichtigt, lediglich die Wahl der erwähnten Gießmethode (Tümpel oder Direkteinguss).

Im Versuchsstadium werden sowohl die Modellierung als auch die Validierung dieser Berechnungsmethoden untersucht, wobei die Ausbringung im Vordergrund steht. Vor dem Serieneinsatz werden Berechnungen mithilfe von Simulationsprogrammen durchgeführt. Hierzu wurden in die Datenbanken die thermo-physikalischen Merkmale für die Speisermischungen und -geometrien hochgeladen.

Wie zuvor erwähnt, konzentrieren sich alle Anstrengungen ausschließlich auf die Umgestaltung der Speisungssysteme mit Schwerpunkt auf dem thermischen Modul.

Designkriterien

Bei der Erstellung des Speiserkonzepts werden mehrere Faktoren berücksichtigt. Die wichtigsten dabei sind: Schrumpfung, Speisungsweite, Speisungsvolumen und Modul.

Die Kombination dieser Variablen muss durch den Einsatz fortschrittlicher Simulationsprogramme austariert werden, sodass die Berechnungen merklich vereinfacht sind und an Zuverlässigkeit gewinnen.

Es wurden zwei vorrangige Arbeitslinien aufgestellt, welche die Bereiche Schwindung/Modul vertiefen.

- Schwindung: Das angewandte Schwindungsmodell wurde in drei Phasen aufgebaut: Die Flüssigschwindung, die hauptsächlich von der Überhitzung der Legierung abhängt, die Erstarrungsschwindung, die auf dem Erstarrungsbereich der Legierung basiert, und die Festphasenschwindung. Das Speisungssystem kann sich auf die ersten beiden Phasen auswirken, während die dritte Phase dem physikalischen Verhalten der Legierung unterworfen ist und nicht merklich beeinflusst werden kann.
- Thermischer Modul: Hierbei handelt es sich um einen Schlüsselwert für das Design. Folglich werden Modul sowohl des Werkstücks als auch des Speisungssystems mit einem Sicherheitsfaktor von ca. 25 % kalkuliert ($M_{Speisung} > 1{,}25\ M_{Gussstück}$).

Simulationswerkzeuge

Im Verlauf des SUPERALLOY-Projekts wurden neuartige Designkonzepte unter der Berücksichtigung bearbeitet, dass ein Einzelgussteil so behandelt werden muss, als wäre es ein Teil einer Serienproduktion. Dieser vorläufige Ansatz führt wichtige Designneuerungen ein, wodurch die Nutzung von Simulationsprogrammen notwendig wird.

Der einwandfreie Zustand des Gussteiles (keine Schwindungsporosität) wurde als Schlüsselpunkt sowohl auf Laborebene als auch bei der Serienfertigung angesehen.

In allen Fällen wurden nachfolgende Anpassungen vorgenommen, wobei die herkömmlichen Designs als Referenz herangezogen wurden. Für die virtuellen Validierungen wurden mehrere Module eingesetzt, die die Gussfehler für alle Varianten vorausberechneten (Bild 2).

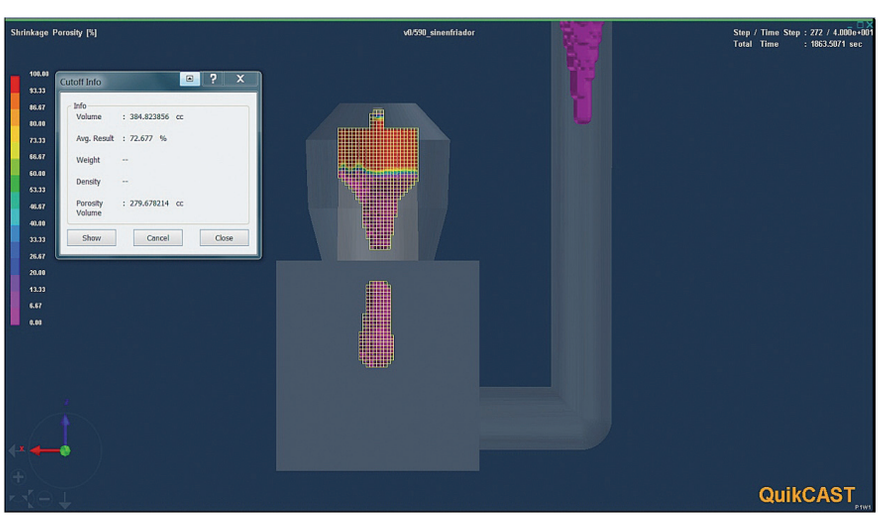


Bild 2: Simulationsgestützte Porositätsvorhersage

Testwerkstück (Probe)

Um den Ausschuss in der Serienfertigung zu minimieren, wurden vor jeder einzelnen Designänderung entsprechende Proben gefertigt. Bei den verwendeten Proben handelte es sich um Prismenblöcke mit einer Seitenlänge von 200 mm (7,88 Zoll) und einem geometrischen Modul von 3,33 cm (1,31 Zoll) (Bild 3).

Die Speisung von jedem Testwerkstück wurde mit den zu untersuchenden Speiserhülsen durchgeführt, wobei die Ergebnisse in allen Fällen hinsichtlich eines charakteristischen Schrumpfungsmodells analysiert wurden.

Es wurden sowohl destruktive als auch nicht-destruktive Techniken angewendet, um den einwandfreien Zustand und das Schrumpfungsausmaß bei jeder Probe zu beurteilen.

Bild 3: Testwerkstücke und zugehörige Speiser ($M_{Werkstück}$ = 3,33 cm)

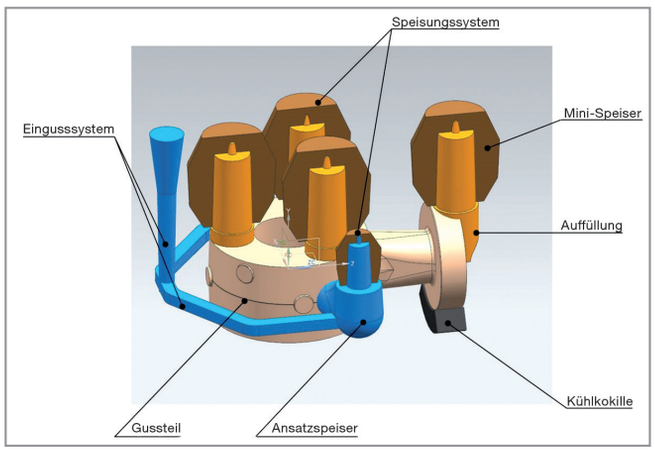


Bild 4: Grundlegende Elemente eines Designs

Versuche in der Fertigung

Alle gewonnenen Erkenntnisse mussten in der Fertigung bestätigt werden (Bild 4), bei denen das einwandfreie Gussergebnis und die Ausbringung beurteilt wurden.

Die vordringliche Anforderung war in allen Fällen die Ausbringung eines einwandfreien Zustands des Werkstücks.

Untersuchte Prozessvariable

Im Mittelpunkt dieser Abhandlung steht die Optimierung der Ausbringung. Folglich wurden die Prozessvariablen, die sich auf die Schwindung auswirken, identifiziert und ausgewertet. Unter all diesen Variablen wurden die wichtigsten ausgewählt und in Bezug auf eine Einflussnahme auf die Schwindung ausgewertet (Bild 5).

Die wichtigsten Prozessvariablen sind:

- Erstarrungsrate
- Designs der isolierenden – exothermen - Speiser und des Speisungssystems
- Metallüberhitzung

Ergebnisse und Erörterung

Die Speiserelemente, die im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekts entwickelt wurden sowie die Validierungstools, die eingesetzt wurden, berücksichtigen mehrere Faktoren, die sich auf das Schwindungsverhalten der untersuchten Legierungen auswirken. Es sind somit Anmerkungen zu folgenden Schlüsselpunkten erforderlich:

Erstarrungsrate

Aus Sicht der Praxis wird die Schwindung aufgrund des Flüssig-/Fest-Intervalls als Eigenschaft jeder Legierung angesehen. Es ist nicht möglich, diese Eigenschaft zu beeinflussen.

Die Analysen durch Simulationsprogramme haben gezeigt, dass mit der Zunahme der Abkühlrate die mit dem Flüssig-/Fest-Intervall verbundene Schrumpfung abnimmt.

Um dieses Verhalten experimentell zu verifizieren wurde ein Test ausgearbeitet und durchgeführt. Unter Nutzung desselben Form- und Speisungssystems wurden mit drei unterschiedlichen Mini-Speisern KMV 1650, KMV 780 und KMV 590 mit einem Modul von 5,7,4,2 und 3,9 Proben geformt, wobei zwei mit einer Kühlkokille ausgestattet wurden und ein Speiser ohne Kühlkokille eingesetzt wurde. In diesem Zustand wurden beide Formen aus derselben Pfanne abgegossen und nach dem Abkühlen wurden die Schrumpfkavitäten ausgewertet.

Es konnte gezeigt werden, dass die Schwindungsfehler der Primär- und Sekundärschrumpfung im Fall der Probe ohne Kühlkokille größer ausfielen. Offensichtlich beeinflusst die Erhöhung der Abkühlrate mithilfe einer Kühlkokille das thermische Modul, allerdings verändert sich auch das Schwindungsverhalten (Bild 6).

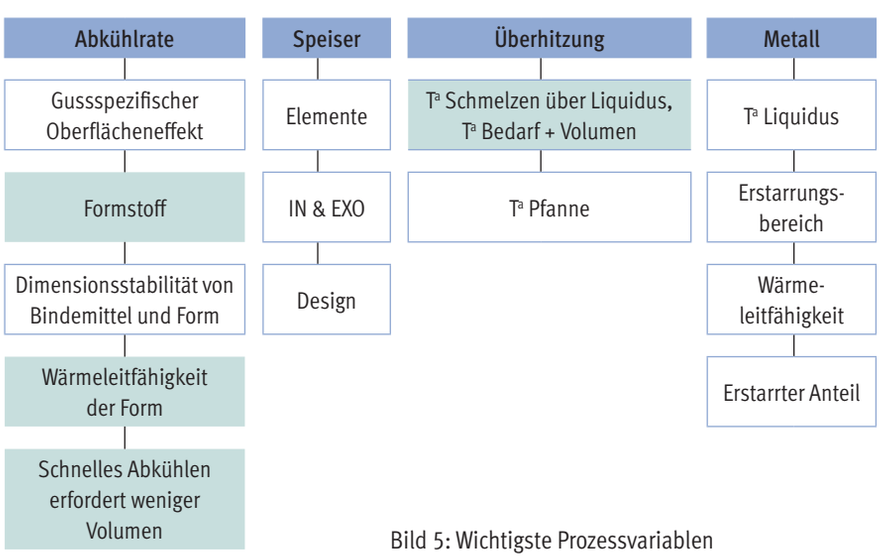


Bild 5: Wichtigste Prozessvariablen

Speiserkappen

Die entwickelten ISO-EXO Speiserkappen und Speisungssysteme kombinieren ihre isolierende-exotherme Wirkungsweise, Geometrie und Zusammensetzung auf ausgewogene Weise. Um die Wärmeleistung zu optimieren wurden die Hauptmerkmale modifiziert, sodass die funktionelle Reaktion gefördert und der ISO-EXO Charakter verstärkt wird.

Komponenten

Es wurden unterschiedliche Zusammensetzungen eingesetzt, um das isolierende und exotherme Verhalten zu optimieren. Hinsichtlich der Zusammensetzung wurde ein auf Alu-

Bild 6: Die Probe wies in den drei gezeigten Fällen keine Schrumpfporosität auf. Probe 1 ohne Kühlkokille und Proben 2 und 3 mit Kühlkokillen.

miniumsilikat- Microspheres-basierendes Isolierungssystem verwendet, welches mit Cold-Box-Technologie gebunden wird (Bild 7).

Isolierende (ISO) und exotherme (EXO) Eigenschaften

Die Strategie zur Optimierung der Speiserleistung basiert auf der isolierenden Wirkung und den exothermen Eigenschaften der Speiser selbst. Vor den Tests in der Fertigung wurde jede einzelne ISO-EXO Formulierung gemessen und ausgewertet (Bild 8).

Die Auswertungen wurden mit dem ETNA-System (einer eigenen, von ASK Chemicals entwickelten, Prüfmethode) durchgeführt, sodass es möglich war, die Faktoren zu identifizieren, welche die isolierende Wirkung jeder Mischung sowie ihr exothermes Verhalten beeinflussen.

Nach den ETNA-Tests (Bild 9) wurden Paare von Testkörpern hergestellt, wobei ausschließlich die exotherme Wirkung der IN-EXO Hülsen modifiziert wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei einem Anstieg des exothermen Anteils der Bedarf des Speiservolumens reduziert.

Geometrien/Modelle

Abhängig von deren Anwendung wurden zu Beginn drei Ausgangsdesigns angewendet.

- ISO-EXO Speiserkappen: Aufgrund ihrer Besonderheiten erfordern sie ein geringeres Gewicht an Metall als herkömmliche Speiserkappen, falls das Modul konstant gehalten wird.
- Speiserkappen mit Konturkissen: Durch die Anpassung ihrer Geometrie an jede Anwendung wird das Entfernen der Speiserreste erleichtert und die Speisungsweite erhöht; auf diese Weise wird die Verwendung von Kühlkokillen vermieden.
- Ansatzspeiser: Die Teile der Form, die von den Speiserelementen beeinflusst werden, sind mit ISO-EXO Mischung umgeben, was den Wärmeeinfluss der Umgebung optimiert.

Neue Designs und Geometrien wurden entwickelt, bei denen bemerkenswerte Vorteile erzielt wurden. Der Aktionsradiusbereich des Speisers wie auch die Speisungsweite wurden erhöht, wodurch die ISO-EXO Reaktion der Mischung selbst verbessert wurde (Bild 10).

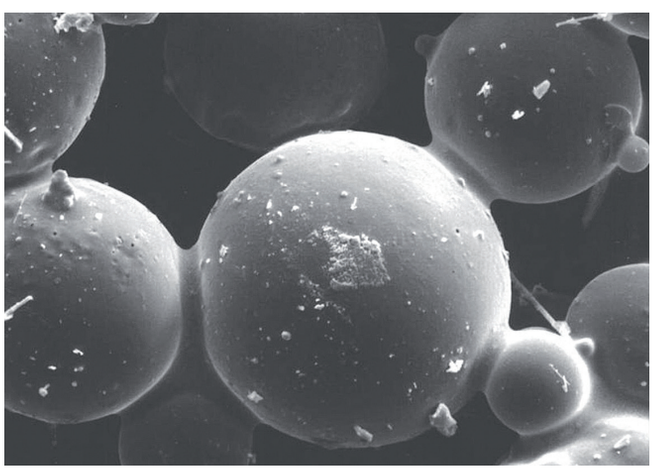
Getestete Materialien

Das Verhalten der unterschiedlichen Eisenbasierten Materialien wurde untersucht und es stellte sich heraus, dass nicht alle von ihnen demselben Reaktionsmodell folgen. Die erhaltenen Informationen gelten für niedrig- und mittellegierte Stähle, Edelstähle unterschiedlicher Natur und Manganstähle.

Die Beziehung zwischen Legierungschemie, Solidus- und Liquidustemperatur, Erstarrungsbereich (schnell und langsam erstarrende Legierungen) und dem erstarrten Anteil wurden untersucht.

Aus Sicht der Speiserwirkung und Simulationsvalidierung besteht ein Zusammenhang zwischen dem Erstarrungsanteil (ausgedrückt als Verhältnis der festen/flüssigen Phase) und der Erstarrungsrate der Legierung. Es stellte sich heraus, dass mit der Zunahme des Erstarrungsanteils das Speisungssystem besser wirkte (Bild 11).

Bild 7: Detailaufnahme des Microspheres-Bindungsmechanismus



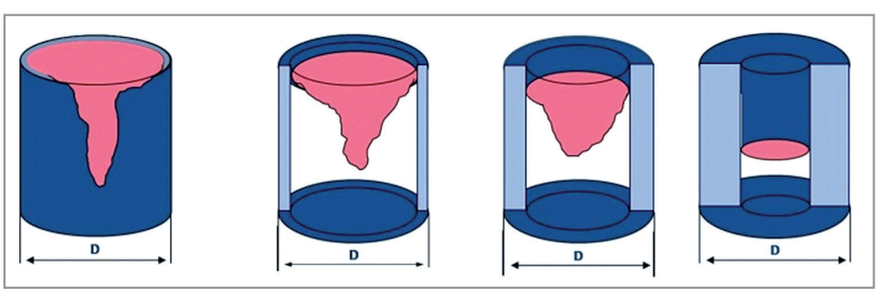


Bild 8: Schrumpfmodelle für unterschiedliche Formeln

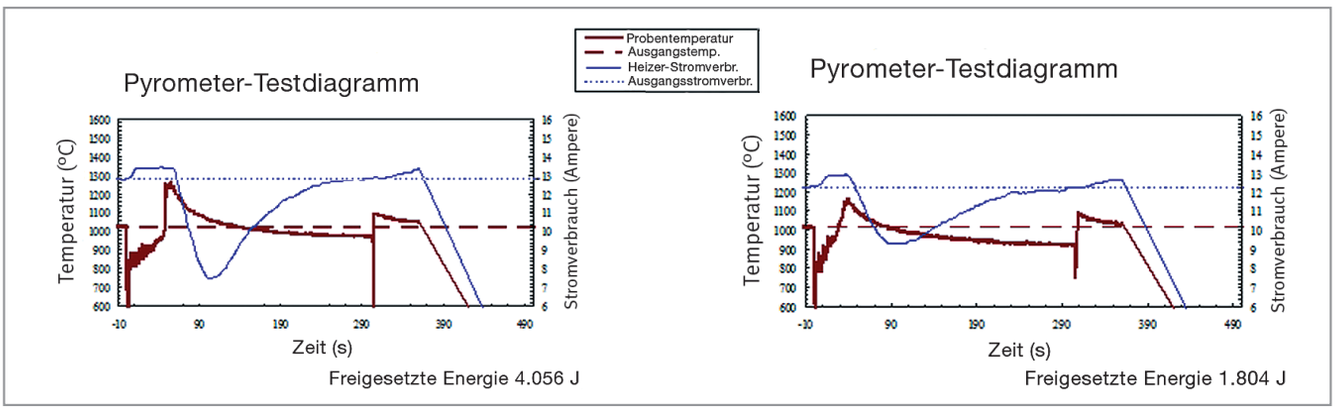


Bild 9: ETNA-Test – isolierendes-exothermes Verhalten für zwei unterschiedliche Zusammensetzungen

Metallüberhitzung

Die Kriterien, mit denen eine Definition der Überhitzungstemperatur einer Legierung bestimmt wird, sind sehr subjektiv und ihre Wirkung auf die Schrumpfung wird selten in Betracht gezogen.

Allgemein kann gesagt werden, dass mit der Zunahme der Überhitzungstemperatur die Tendenz zur Schwindung ebenfalls zunimmt (Bild 12).

Bei der Optimierung der Reaktion der ISO-EXO Mini-Speiser wurde die Volumenzunahme pro jeweils 100 °C der Überhitzung als Referenz herangezogen, was Werten von ca. 1 % entspricht.

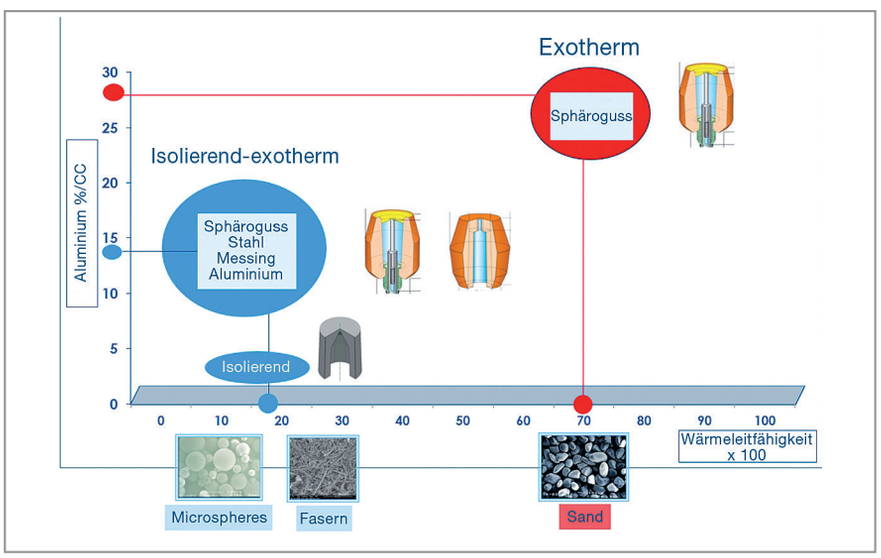


Bild 10: Im SUPERALLOY-Projekt untersuchte Geometrien und Zusammensetzungen

Bild 11: Manganstahl-Gussteil – Verhalten herkömmlicher Speiser (links außen) vs. Mini-Speiser (Mitte und rechts)

Metallurgische Überlegungen

Neben Vorteilen in der Produktivität sind Kostensenkungen sowie die Optimierung der Ausbringung erzielt worden. Zusätzlich wurden metallurgische Verbesserungen in den verschiedenen Versuchslegierungen erreicht, die im Folgenden genannt werden:

- Die geringere Wärmeträgheit der Form bedeutet eine Reduzierung der lokalen Wärmebelastung, was zu einem Hilfsmittel zur Fehlermeidung (Risse usw.) für Gießereien wird
- Günstigeres Mikrogefüge und Minimierung des Grobkornbildungs-Phänomens
- Geringere Ausschussrate und höhere Materialausbringung. Die Öfen werden mit einem höheren Anteil an Ingot beschickt, was die Gussqualität verbessert
- Reduzierung von Kreislaufmaterial
- Speiser mit einem verkleinerten Speiserhals können in einigen Fällen die Glühbehandlung vermeiden, die erforderlich ist, um den Restspeiser abzutrennen, ohne Risse im Werkstück zu verursachen.

Versuche in der Fertigung

Mehrere praktische Versuche wurden in verschiedenen Gießereien durchgeführt. Hier war das Ziel, eine Bestätigung für die Vorteile der neuen Speisungssysteme in der Fertigung zu erhalten, diese an einer Reihe von repräsentativen echten Werkstücken zu belegen und somit die Wettbewerbsvorteile durch die Entwicklung des SUPERALLOY-Projekts aufzuzeigen.

Das Schema der Abgüsse war sehr einfach, da die Verwendung der herkömmlichen und fortschrittlichen Speisungssysteme miteinander verglichen und dadurch die direk-

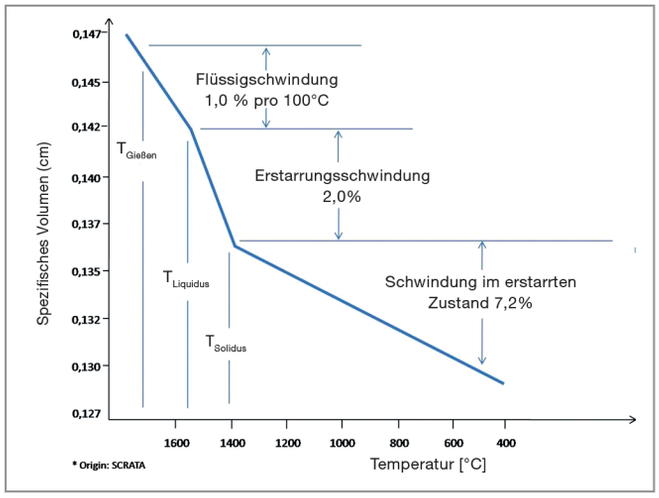


Bild 12: Darstellung der drei Schrumpfungsstadien

Bild 13: Beispiel der Ausbringungsverbesserung (Edelstahl)

ten Verbesserungen hinsichtlich der Ausbringung verdeutlicht wurden.

Die Versuche in der Fertigung wurden mit Komponenten durchgeführt, die in unterschiedliche Kundensegmente geliefert werden. Die Erfüllung von unterschiedlichen Anforderungen wurde somit als unerlässliche Bedingungen für die Validierung jedes Tests zu Grunde gelegt.

Vor jedem Versuch in der Fertigung erfolgten entsprechende vorläufige Validierungen, bei der die thermo-physikalische Charakterisierung der neuen Mischung als Eingangsdaten für die Berechnungen verwendet wurde.

Anhand der nachfolgenden Bilden werden die Verbesserungen der Ausbringung, die durch Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse erzielt wurden, eindeutig dargestellt (Bilder 13 und 14).

Bild 14: Die Ausbringung wurde von 58 % (oben) auf 76 % (unten) gesteigert und die Bearbeitungszeiten wurden optimiert (Edelstahl).

Schlussfolgerungen

Die Kontrolle durch die derzeit verfügbaren Simulationsprogramme ermöglicht – vorausgesetzt die thermo-physikalischen Merkmale der neuen Mischungen werden sachgemäß implementiert – einen Abguss, der – selbst bei Einzelchargen – in allen Fällen zu verbesserten Ausbringungen führt.

Die Speisungssysteme für alle Stahlgusskomponenten können erfolgreich mit ISO-EXO Mini-Speisern, Speiserkappen mit Konturkissen und Ansatzspeisern konstruiert werden.

Es wurde eine Netto/Brutto Ausbringung von über 60 % erzielt, allerdings müssen die richtigen Designkriterien angewendet und im Prozess rigoros implementiert werden Dieses Verbesserungspotential der Ausbringung nicht zu nutzen, würde bedeuten, wichtige Wettbewerbsvorteile zu verschenken.

Um einwandfreie Werkstücke ohne Schwindungsporositäten und mit hohen Erträgen zu fertigen, muss die richtige Korrelation zwischen der Metallüberhitzung, dem ISO-EXO Verhältnis des Speisungssystems und der Kühlwirkung der Form gefunden werden.

Danksagungen

Unsere Danksagung und Anerkennung gilt dem Ministerio de Ciencia e Innovación für die Unterstützung, die wir bei den INNOXCAST- (IPT-240000-2010-027) und SUPERALLOY-Projekten erhielten, welche als Basis zur Vorbereitung dieser Abhandlung dienten.

Wir möchten unsere Danksagung auch auf die Mitarbeiter des Bereichs Engineering and Fabrication bei FONDESAL ausweiten, da es ohne ihre aktive Beteiligung nicht möglich gewesen wäre, diese wichtigen Entwicklungen abzuschließen und uns auch bei allen Gießereien bedanken, bei denen diese innovative Technologie industriell getestet wurde. ◄

Literatur

[1] I. Berriozabalgoitia, D. Peña, G. Trillo, J. Izaga, , P. R. Ronald, „Optimization of Chemically Bonded Sand Moulds“, 70th World Foundry Congress, Monterrey, Mexiko (2012).

[2] J. Prat, „Solutions to the increasing technical and health and safety demands in the moulding process of big size wind energy castings“, VI International Foundry Technical Forum, Bilbao, Spanien (2009).

[3] J. Prat, et al., „New Casting Solutions: Numerically Simulated EXACTCAST™ Core-Sleeves Eliminate Critical Problems With Automobile High-Security Components (Patented)“; 66th World Foundry Congress, Istanbul, Türkei (2004).

[4] J. Prat, et al., „Improving Casting Performance through Customized Insulating Shapes and Advanced Simulation Techniques“, 67th World Foundry Congress, Harrogate, Großbritannien (2006).

[5] J. Prat, „Latest developments in Feeding Systems for Steel and nodular iron castings“, VIII International Foundry Technical Forum, Bilbao, Spanien (2013).

[6] J. Prat, et al., Patent-Nr. RU 2202437, (12. April 2003)