

Aufbau und Anwendung vakuummetallurgischer Anlagen für den Giessereibetrieb

Autor(en): **Vollmer, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **86 (1968)**

Heft 24: **Zur 3. Internationalen Giesserei-Fachmesse Düsseldorf 20.-26.
Juni 1968**

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-70058>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Aufbau und Anwendung vakuummetallurgischer Anlagen für den Giessereibetrieb

Von H. Vollmer, dipl. Ing., Balzers

DK 66.041.82:621.74

Genau so wie viele andere Verfahren der modernen Industrie hat sich auch die Vakuummetallurgie erst in den letzten 30 Jahren aus bescheidenen Anfängen zu einem wichtigen Zweig der modernen Fertigungstechnik entwickelt.

Die ersten Versuche, Metalle und Legierungen in produktionstechnischem Massstab unter vermindertem Druck zu erschmelzen, führte bereits 1928/29 W. Rohn [1] im Induktions-Rinnenschmelzofen durch. Infolge ungenügender vakuumtechnischer Hilfsmittel trat dann in der Entwicklung von Induktions-Vakuumöfen von Ende der zwanziger Jahre bis Mitte des Zweiten Weltkrieges nahezu ein Stillstand ein, der erst durch die wesentlich gesteigerten Anforderungen an Qualität und Eigenschaften der metallischen Werkstoffe überwunden wurde. Zu Beginn dieser Entwicklung stand zunächst der induktiv beheizte Vakuumschmelzofen im Vordergrund. Vakuuminduktions-schmelzöfen bis zu einem Fassungsvermögen von 25 kg Stahl, die es ermöglichten, Metalle und Legierungen unter Hochvakuumbedingungen zu erschmelzen und zu vergiessen, wurden in Europa erstmalig von der Firma Balzers AG in Liechtenstein in Serie gebaut. Die damals erarbeiteten Konstruktionsprinzipien sind bis heute unverändert geblieben; geändert haben sich die Abmessungen, und das Zubehör ist reichhaltiger geworden. Bild 1 zeigt einen 1,2-t-Induktions-Vakuum-Ofen der Firma Balzers AG. Die bisher grössten Öfen dieser Art haben ein Fassungsvermögen für Stahl von 30 t (Europa) bzw. 60 t (USA).

Fast parallel mit der Entwicklung von Induktions-Vakuum-Öfen befasste man sich mit der Entwicklung eines neuen Vakuumschmelzaggregates, nämlich des Lichtbogen-Vakuum-Ofens (LBV-Ofen) mit Abschmelzelektrode. Ursprünglich war dieser Ofen vornehmlich für das Schmelzen der reaktionsfreudigen Metalle Titan und Zirkon bestimmt, doch wird er heute in grossem Umfange auch für die Erschmelzung von Stählen und hochwarmfesten Legierungen verwendet. Pionierarbeit in Europa hat dabei die Firma Degussa in Hanau geleistet. Ein von dieser Firma im Jahre 1959 gebauter LBV-Ofen mit einem Fassungsvermögen für Stahl von 350 kg ist in Bild 3 zu sehen. Der grösste Ofen dieser Art mit einem maximalen Blockgewicht von 50 t bei einem Blockdurchmesser von 1500 mm steht in den USA. Die Gesamtkapazität der Induktions-Vakuum- und LBV-Öfen der westlichen Welt wird auf rund 250000 t/Jahr geschätzt, wobei das Kapazitätsverhältnis beider Ofentypen in den USA 1:1, in Europa 1:4 zugunsten des LBV-Ofens, beträgt. Für Werkstoffe,

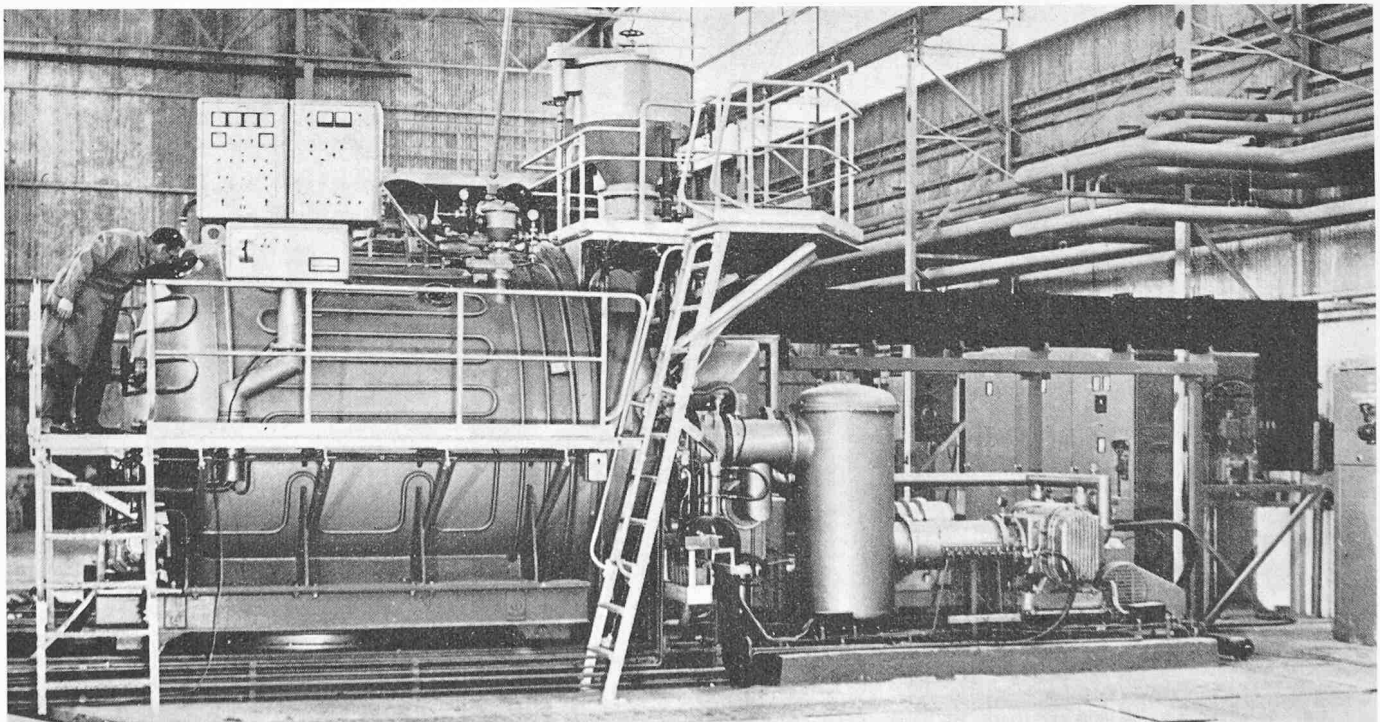
an die besondere Qualitätsanforderungen zu stellen sind, hat sich das Vakuum-Doppelschmelzen eingeführt, wobei das Material im Induktions-Vakuum-Ofen vorgeschmolzen und danach im Lichtbogen-Vakuum-Ofen umgeschmolzen wird.

Das teuerste aber auch vielseitigste und metallurgisch optimale Vakuumschmelzaggregat, das heute dem Metallurgen zur Verfügung steht, ist der Elektronenstrahl-Ofen (ES-Ofen). Er besitzt die Vorteile des Induktion-Vakuum-Ofens (beliebig lange Entgasungszeit und beliebige Überhitzung) und des LBV-Ofens (keine Tiegelreaktion mit dem Metalltiegel), ohne deren Nachteile aufzuweisen. ES-Öfen werden heute noch vorzugsweise zur Erschmelzung von Niob und Tantal in beschränktem Umfange auch für Mo, W und Zr eingesetzt, doch gibt es in Europa auch ES-Öfen, in denen Nickel, Nickellegierungen, Stähle und hochwarmfeste Legierungen erschmolzen werden.

In der Giessereiindustrie fanden vakuummetallurgische Anlagen erst relativ spät Eingang. Im Vordergrund steht nach wie vor das Vakuumpräzisionsgiessereiverfahren, das in erster Linie für die Herstellung von Gasturbinenteilen aus hochwarmfesten Nickellegierungen eingesetzt wird. Bekanntlich kann bei Gasturbinen der thermische Wirkungsgrad durch Erhöhung der Arbeitstemperatur beträchtlich gesteigert werden. Zur Erzielung der geforderten Festigkeiten bei hohen Temperaturen mussten den Nickellegierungen teilweise höhere Gehalte der stark sauerstoffaffinen Elemente Al, Ti, Zr, und Bor zulegiert werden, die es in der Folge erforderlich machten, diese «hochwarmfesten Legierungen» zur genauen Dosierung dieser Legierungszusätze und zur Vermeidung unerwünschter Oxyd- oder Nitrideinschlüsse im Vakuum zu erschmelzen und zu vergiessen. Wurden zu Beginn dieser Entwicklung ausschliesslich Vakuumöfen konventioneller Bauart verwendet, die dem besonderen Verwendungszweck mehr oder weniger gut angepasst waren, so handelt es sich bei den heute verwendeten Aggregaten um Spezialanlagen, die auch auf diese besondere Anwendung optimal abgestellt sind.

Die Balzers AG hat vor fünf Jahren eine hochspezialisierte Anlage für diesen Verwendungszweck auf den Markt gebracht, die anhand von Bild 2 kurz erläutert werden soll. Die horizontal gebaute Anlage ist in drei getrennt evakuierbare Räume aufgeteilt. Raum 1 bildet den Hauptkessel, in dem sich die drehbar gelagerte Spule 6 mit dem eingebauten Schmelztiegel befindet. Über den Raum 2 werden die Präzisionsgussformen 7 in die Hauptkammer 1 mit Hilfe des Schwenkarmes 8 eingeschleust. Mit dem grossen Schleusenventil 4 können

Bild 1. Balzers-Induktions-Vakuumschmelzanlage mit einem Fassungsvermögen von 1,2 t



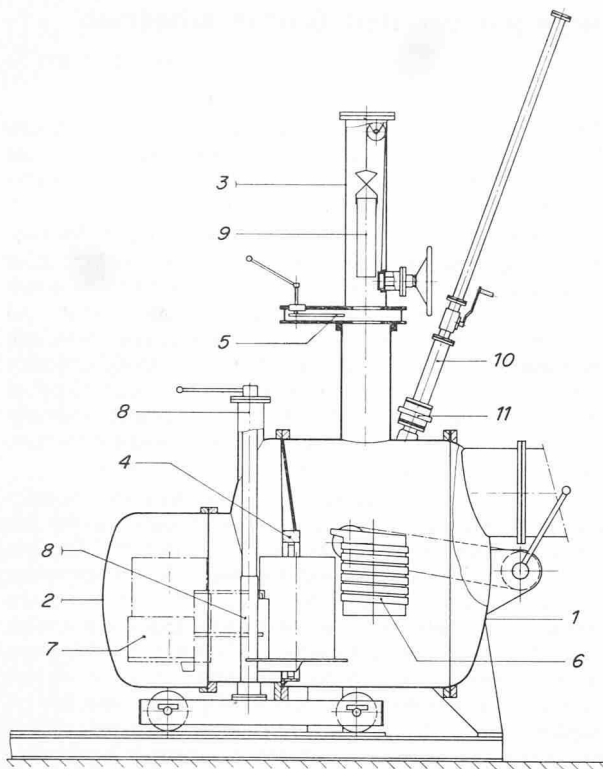
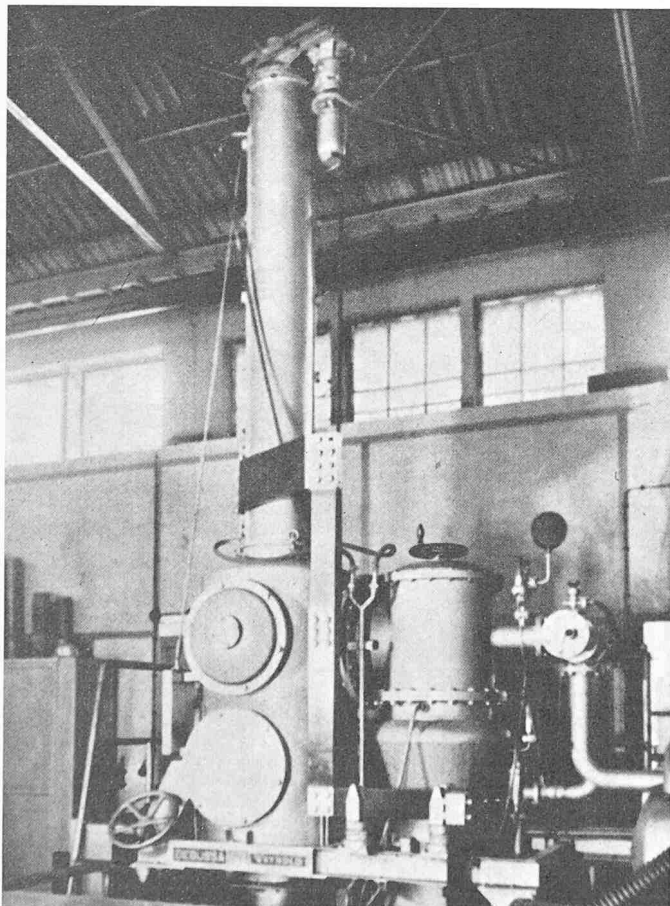


Bild 2. Balzers-Hochvakuum-Präzisionsgiessanlage

- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| 1 Hauptkessel | 6 Heizspule |
| 2 Formenschleuse | 7 Präzisionsgussform |
| 3 Schleusenkammer für Vormaterial | 8 Schwenkarm |
| 4, 5 Ventile | 9 Vormaterial |
| | 10 Tauchthermometer |
| | 11 Schiebeventil |

Bild 3. Degussa-Lichtbogen-Vakuumofen Baujahr 1959 mit einem Fassungsvermögen von 350 kg Stahl

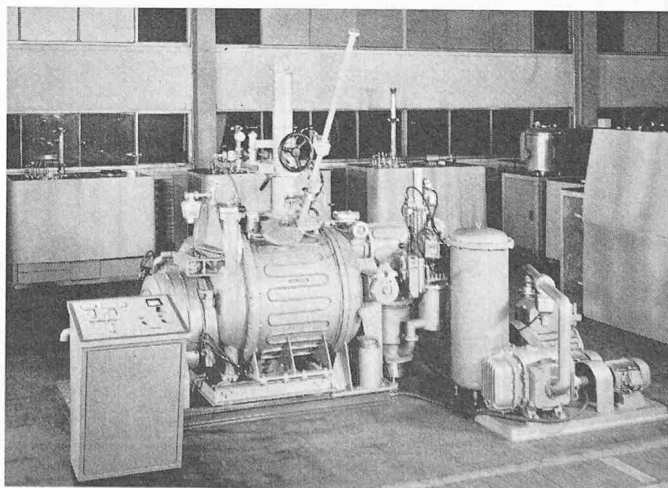


die Räume 1 und 2 vakuumdicht voneinander abgetrennt werden. Raum 3 stellt die Einschleuskammer für das Präzisionsgussvormaterial dar, das über einen Seilzug von oben in den Tiegel abgesenkt wird. Raum 3 wird von dem Hauptkessel 1 durch das Ventil 5 vakuumdicht abgeschlossen. Die Vorrichtung 10 ist ein einschleusbares Tauchthermoelement, mit dem die Badtemperatur beliebig oft gemessen werden kann. Das Schiebeventil 11 stellt sicher, dass das Thermoelementschutzrohr im Bedarfsfalle ausgewechselt werden kann, ohne dass das Vakuum im Hauptkessel unterbrochen werden muss. Der Hauptkessel 1 befindet sich im Normalbetrieb ständig unter Vakuum, wobei der Arbeitsdruck zwischen 10^{-3} und 10^{-4} Torr liegt. Das bereits in Induktions-Vakuum-Öfen erschmolzene Vormaterial 9 wird zunächst in die Schleusenkammer 3 gebracht und danach die Kammer evakuiert. Nach dem Öffnen vom Ventil 5 wird der Tiegel beschickt und das Schmelzgut mit einer Schmelzgeschwindigkeit von 1,5 kg/min verflüssigt. Während nach dem Einschmelzen mit Hilfe des Thermoelements 10 die Giesstemperatur des Bades eingestellt wird, wird die Formenschleuse 2 mit der auf 1100 bis 1150 °C vorgeheizten Präzisionsgussform 7 beladen und in 45 s evakuiert. Nach Erreichen des gewünschten Druckes in der Kammer 2 öffnet das Ventil 4 automatisch, so dass die Giessform 7 in Giessstellung gebracht und abgegossen werden kann. Schon während des Einschmelzens wurde die Kammer 3 neu beschickt, so dass sofort nach dem Abguss der Tiegel neu beschickt und damit der nächste Schmelzyklus begonnen werden kann. Bei 8-kg-Chargen sind Gesamtzykluszeiten von 8 bis 12 min zu erzielen, bei 15-kg-Chargen erhöht sich die Zeit auf 12 bis 15 min. Bild 4 veranschaulicht diese Anlage. Links das Steuerpult, rechts der Pumpstand mit Vorpumpe, Roots-pumpe, Diffusionspumpe und Staubfilter. Die Bilder 7 und 8 zeigen präzisionsgegossene Turbinenräder bzw. Turbinenschaufeln verschiedener Form und Grösse.

Hiermit wurde eine vakuummetallurgische Anlage beschrieben, die speziell für den Giessereibetrieb konstruiert wurde und die den Giessereifachmann in die Lage versetzt, Metalle und Legierungen mit niedrigstem Gasgehalt und kleinstem Anteil an nichtmetallischen Einschlüssen unter Hochvakuumbedingungen ($<10^{-3}$ Torr) zu erschmelzen und in Präzisionsgussformen zu vergiessen. An diese Anlage müssen die gleichen vakuumtechnischen Anforderungen wie an jede andere Hochvakuumerschmelz- und Giessanlage gestellt werden.

Anders verhält es sich mit Vakuumerschmelzanlagen, die zur Vakuumbehandlung von niedrig legierten Stählen, Stahlguss und Guss-eisen eingesetzt werden. Hierbei sind die Anforderungen sowohl bezüglich Dichtigkeit als auch den Enddruck betreffend weit geringer und dementsprechend auch der bauliche Aufwand kleiner. Die Induktionsspule wird vom Vakuumkessel eng umschlossen, so dass Kessel und Spule gemeinsam gekippt werden müssen. Nach der Vakuumbehandlung, die im Druckbereich von 1 bis 0,05 Torr erfolgt, wird das flüssige Metall an der Luft vergossen. Besonders bei siliziiertem Gusseisen ist es möglich, durch eine Vakuumbehandlung zu entschwefeln [2]. Wie bei allen anderen Stählen und Legierungen, so ist bei Gusseisen besonders dann mit Fortschritten durch Schmelzen unter vermindertem Druck zu rechnen, wenn hochlegierte Qualitäten mit höheren Gehalten an sauerstoffaffinen Elementen wie Si, Cr, Al, Ti und ähnliche behandelt werden. Leider wurden bisher weder

Bild 4. Ansicht der Vakuumgiessanlage nach Bild 2



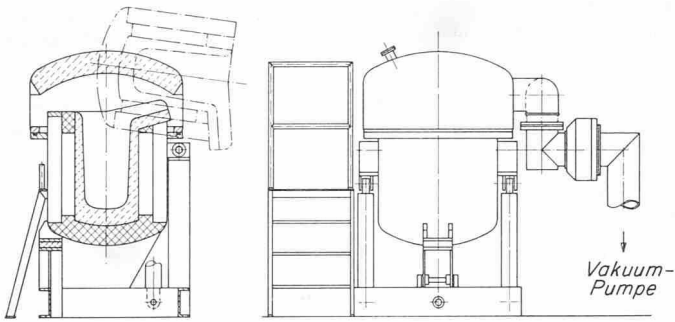


Bild 5. Vakuumschmelzanlage für niedrig legierte Stähle, Stahlguss und Gusseisen

von Instituten noch von Giessereien gründliche und umfassende Untersuchungen an vakuumerschmolzenem Gusseisen durchgeführt. Einzeluntersuchungen ergaben ähnliche Verbesserungen wie sie auch an Stählen und Legierungen gefunden wurden: geringere Gasgehalte, Verminderung des Einschlussgehaltes, Verbesserung der Zähigkeits-eigenschaften (bei Gusseisen in geringerem Umfang als bei Stählen) und Verringerung der Porosität.

Die Vakuumindustrie ist in der Lage, für die Vakuumbehandlung von Gusseisen verhältnismässig einfache, dem Verwendungszweck angepasste Öfen zu liefern. Besonderer Beachtung bedarf dabei das Tiegelproblem, da die Reduktionskraft des Kohlenstoffes unter vermindertem Druck stark erhöht und dadurch der chemische Angriff auf den Tiegelwerkstoff stärker wird. Bild 5 zeigt schematisch eine Vakuumschmelzanlage, die speziell für die Vakuumbehandlung niedrig legierter Stähle mit Kohlenstoffgehalten über 0,2%, für Stahlguss und Gusseisen entwickelt wurde. Sie hat einen nur geringfügig grösseren Platzbedarf als induktiv beheizte Luft-Schmelzöfen und ist wesentlich billiger als Hochvakuum-Schmelz- und Giessanlagen gleicher Schmelzkapazität. Zusatzvorrichtungen wie Tauchthermoelemente, Probeentnahmeverrichtung, Nachchargiervorrichtung, optische Temperaturmessgeräte usw. können geliefert werden. Da die Ofenhaube zum Beschicken und Giessen abgenommen wird, ist auch eine Schlackenbehandlung des Bades, die vorteilhaft vor der Vakuumbehandlung durchgeführt wird, möglich.

Wie bereits erwähnt, werden Spule und Ofenbehälter miteinander gekippt. Da in die Vakuumleitung ein vakuumdichtes, drehbares Verbindungsstück eingebaut ist, kann der Ofen gekippt werden, ohne dass die Verbindung zum Pumpstand unterbrochen wird. Durch geringe Änderung an dem Ofen ist es möglich, die Voraussetzung dafür zu schaffen, dass das Schmelzgut auch unter Schutzgas ver-

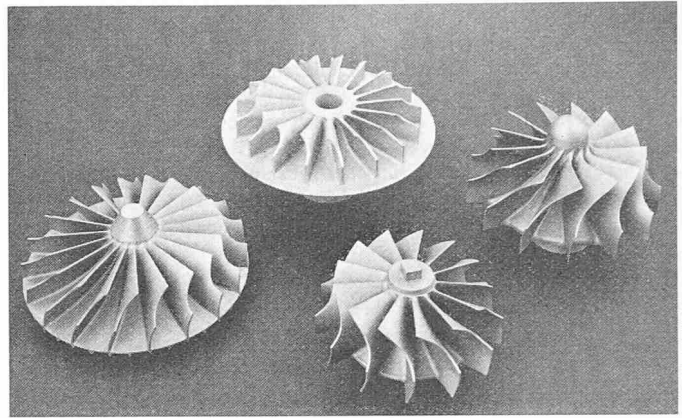


Bild 7. In Vakuum präzisionsgegossene Turbinenräder. Werkbild Gebr. Sulzer AG

gossen werden kann. Dies ist dann von Vorteil, wenn die Gefahr besteht, dass das flüssige Metall beim offenen Vergiessen an Luft unerwünscht viel Sauerstoff, Stickstoff oder Wasserstoff aufnimmt. Entsprechende Vorkehrungen an der Kokille oder an der Giessform erhöhen noch die Wirksamkeit des Schutzgasschleiers.

Eine Sonderanlage für giessereitechnische Zwecke ist die in Bild 6 gezeigte Lichtbogen-Vakuum-Schmelzanlage. Die angewandte Schmelz-Methode, mit der Gussstücke aus Ti und Zr hergestellt werden, wird als «skull melting» bezeichnet. Sie ist charakterisiert durch Verwendung einer selbstverzehrenden Elektrode aus dem zu schmelzenden Metall oder der Legierung, die mit hoher Abschmelzgeschwindigkeit in einen flachen «Tiegel» aus wassergekühltem Kupfer abgeschmolzen wird. Da infolge der hohen Abschmelzgeschwindigkeit eine gute Entgasung des Elektrodenwerkstoffes nicht mehr möglich ist, ist das Schmelzgut vorher bereits vakuumgeschmolzen und dementsprechend gut entgast. Zuzufolge der Wasserkühlung überzieht sich die Tiegelinnenwand mit einer Metall-Haut (skull), so dass das flüssige Metall mit der Tiegelwand aus Kupfer praktisch nicht in Berührung kommt. Ist das Einsatzgut verflüssigt, so wird der drehbar gelagerte Kupfertiegel rasch gekippt und das Metall in die Form – die in diesem Fall meistens aus Graphit besteht – gegossen. Titangussstücke werden zufolge ihres günstigen Festigkeits-Gewichtsverhältnisses in steigendem Masse bei Überschallflugzeugen und Raketen verwendet.

Wie oben erwähnt, werden vakuummetallurgische Anlagen in den letzten Jahren auch in Giessereien in zunehmendem Masse eingesetzt. Damit ist es der Vakuumindustrie gelungen, den Beweis zu führen, dass sie heute in der Lage ist, auch für den hohen Anforderungen an Robustheit und Betriebsicherheit stellten Giessereibetrieb wirtschaftlich arbeitende Anlagen zu erstellen. Sicherlich können Stahl- und Graugusserzeugnisse auch bei gesteigerten Qualitätsmerkmalen weit weniger mit zusätzlichen Herstellkosten belastet

Bild 8. In Vakuum präzisionsgegossene Turbinenschaufeln. Werkbild Gebr. Sulzer AG

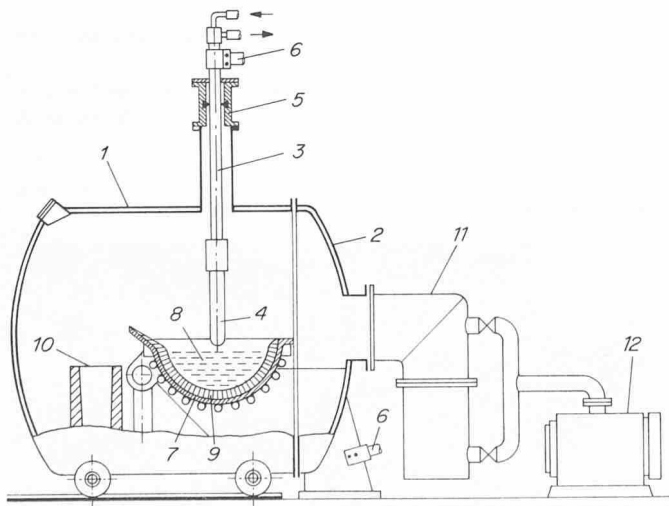
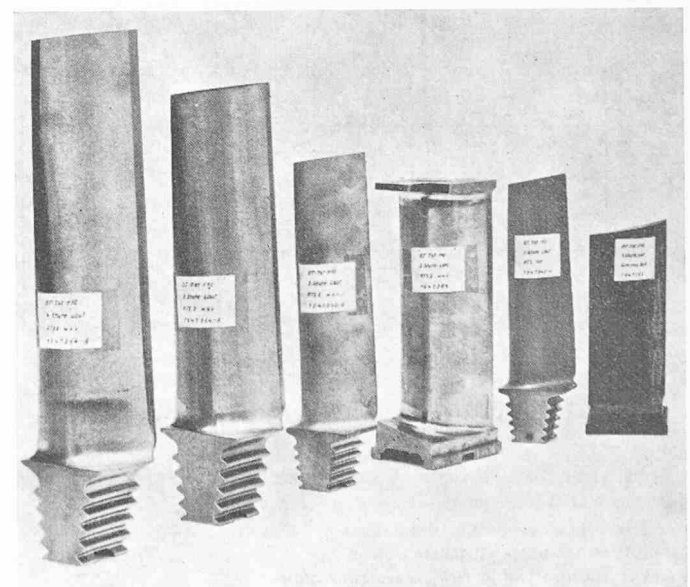


Bild 6. Hochvakuum-Lichtbogenschmelzanlage mit Abschmelzelektrode

- | | |
|--|--|
| 1 fahrbarer Vakuumsesselteil | 7 gekühlte Kupferschale |
| 2 feststehender Kesselteil | 8 Schmelzsumpf |
| 3 verschiebbarer, wassergekühlter Elektrodenhalter | 9 erstarrte Zone |
| 5 vakuumdichte Durchführung | 10 Kokille |
| 6 Stromanschluss | 11 Hochvakuumdiffusionspumpe mit Plattenventil |
| | 12 Vorpumpe |

werden als teure Spezialstähle und Sonderlegierungen. Dennoch können auch in Giessereien eine Reihe von Problemen mit geringerem Aufwand und daher wirtschaftlicher mit vakuummetallurgischen Anlagen gelöst werden. Die Vakuumindustrie und nicht zuletzt die vakuummetallurgische Industrie hat sich in den letzten Jahren sprunghaft entwickelt und ist aus dem Stadium des Experimentierens heraus in die Fertigung grosstechnischer Produktionsanlagen hineingewachsen. Hunderten von vakuummetallurgischen Anlagen in der ganzen Welt ist es unter anderem zu verdanken, dass die metallherzeugende und -verarbeitende Industrie heute in der Lage ist, auch extreme Forderungen bezüglich Reinheitsgrad und technologischen Eigenschaften der metallischen Werkstoffe zu erfüllen. Die Kosten für die Vakuumschmelzung konnten in den letzten Jahren um den

Faktor 2 bis 3 gesenkt werden, so dass es heute möglich ist, auch weniger teure Metalle wirtschaftlich einer Vakuumbehandlung zu unterziehen.

Adresse des Verfassers: H. Vollmer, dipl. Ing., Chef der metallurgischen Entwicklung, Balzers Aktiengesellschaft für Hochvakuumtechnik und dünne Schichten, FL-9496 Balzers.

Literaturverzeichnis

- [1] «Z. Metallkunde» 21 (1929) S. 12/18
 [2] B. Lux und W. Kurz: Vakuumentschwefelung und -Desoxydation von Gusseisenschmelzen, Battelle Institut Genf. Vortrag auf dem «Congrès International sur les Applications des techniques du vide à la métallurgie», Strasbourg 13. bis 17. Nov. 1967.

Schweisbarkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit zu Reparatur- und Produktionszwecken

Von W. F. Ridgway, A. I. M., A. M. Inst., W., London; deutsche Fassung von M. Künzler, Zürich

DK 539.512:669.131

Einleitung

Durch die neuzeitlichen Entwicklungen auf dem Gebiete der Schweisstechnik wurde der Hersteller von Schweisskonstruktionen in die Lage versetzt, auch bei diesen Fertigungsmethoden aus einer grossen Auswahl ferritischer Werkstoffe den wirtschaftlich günstigsten zu verwenden. Obwohl bei Gusseisen mit Kugelgraphit keine so ausgezeichnete Schweisbarkeit zu erzielen ist, wie bei speziell zu diesem Zweck entwickelten Stählen, ist es doch möglich, durch sorgfältige Auswahl des Schweissverfahrens und des Zusatzwerkstoffes, Schweissverbindungen zu erzielen, die den Anforderungen einer Vielzahl von Verwendungszwecken genügen. Bei einigen Sorten kann sogar die strengste Bedingung erfüllt werden, nämlich jene, die verlangt, dass eine Schweissstelle gleichwertige Eigenschaften aufweisen muss, wie die des zu schweisenden Grundmaterials.

Metallurgische Erwägungen

Die gute Schweisbarkeit von Baustählen, mit denen Gusseisen mit Kugelgraphit oft verglichen wird, ist eine Folge ihres geringen Kohlenstoffgehaltes. In den wärmebeeinflussten Stellen eines geschweissten Stahlteiles finden metallurgische Veränderungen statt, die zu Sprödigkeit führen können. Die Wahl der geeigneten Zusammensetzung sowie die Einhaltung einiger einfacher

Massnahmen, wie zum Beispiel das Vorwärmen der Teile, die Verwendung von Elektroden mit geringer Neigung zu Wasserstoffabscheidung usw., unterbinden hier aber meistens diese Schwierigkeiten. Bei Gusseisen mit Kugelgraphit sind die beim Abkühlen aus der Schweisstemperatur entstehenden metallurgischen Veränderungen auch durch die Anwendung spezieller Verfahren nicht ohne weiteres umkehrbar. Neben dem martensitischen Gefüge, welches sich bei beiden Materialien bildet, entsteht bei Sphäroguss eine eutektische Karbidzone, die sich an der Schmelzgrenze bildet. Entsprechende Messungen an dieser Grenzschicht haben Härtezahlen von 400 bis 700 Hv ergeben, Bild 1. Obwohl dies die Güte des Werkstückes nicht beeinträchtigt, verursacht es doch vielfach erhebliche Schwierigkeiten bei dessen Bearbeitung. Das Glühen nach dem Schweißen kann wohl diese Grenzzone zum Verschwinden bringen, nicht aber dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, da die ursprüngliche Dehnbarkeit nicht vollumfänglich wiederhergestellt werden kann.

Die Bildung der genannten eutektischen Grenzschicht, Bild 2, ist beim Lichtbogen-Schweissverfahren nicht zu vermeiden, wenn die Temperatur des dem Schweissmetall angrenzenden Werkstoffes über die des Eutektikums zu liegen kommt. Das dabei vorhandene Austenit löst die Graphit-Sphärolithen auf und bildet eine kohlenstoffreiche Mischung; die Masse des umliegenden Materials bewirkt dann einen raschen Wärmeentzug, und die Mischung erstarrt in Form hochgekohten Martensits und freien Karbids. Bei perlitischen Gusseisensorten tritt diese Erscheinung oft noch stärker hervor, weil die Umwandlung in Martensit mit noch höherem Kohlenstoffgehalt leichter erfolgt. Zur Verminderung dieser Schwierigkeiten können die nachstehenden Massnahmen zum Erfolg führen:

1. Die Schweissverbindung ist bei Temperaturen unterhalb des Eutektikums (rund 1100 °C) herzustellen.
2. Die Abkühlungsgeschwindigkeit sollte so weit vermindert werden, dass Gleichgewicht herrscht, d. h. dass die erwärmte Stelle

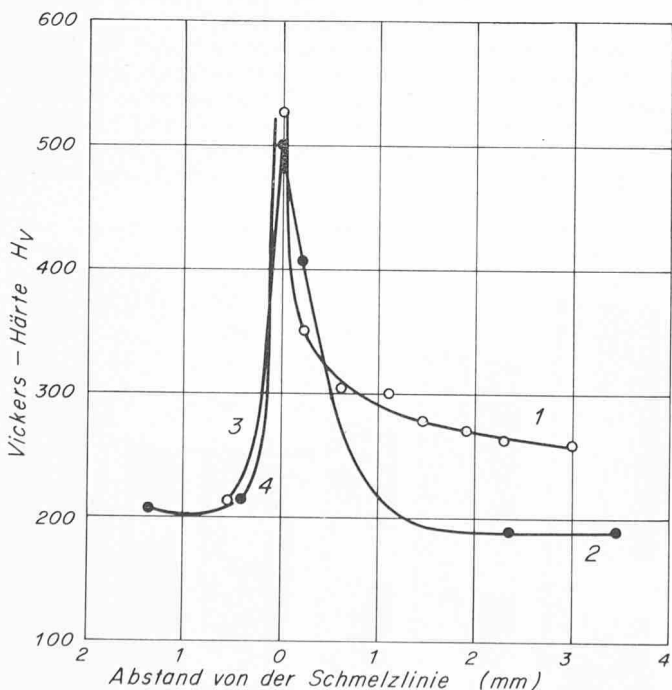


Bild 1. Verlauf der Härte in Funktion des Abstandes von der Schmelzlinie bei einer Schweissnaht an Gusseisen mit Kugelgraphit. Ohne nachträgliche Wärmebehandlung

- 1 Härteverlauf bei perlitischem Gefüge
- 2 Härteverlauf bei ferritischem Gefüge
- 3 und 4 Härteverlauf im Ni-Fe-Zusatzwerkstoff

Bild 2. Gefüge der Schmelzlinie einer Lichtbogenschweissung von Gusseisen mit Kugelgraphit, ohne nachträgliche Wärmebehandlung

