Einsatz von Ultraschall für die Schmelzebehandlung in der Gießereiindustrie – Überblick und numerische Betrachtungen

Eric Riedel[1], Mostafa Ahmed[1], Philipp Köhler[1]

[1] *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Deutschland, Email: eric.riedel@ovgu.de*

Einleitung

Die Gussteilfertigung gilt als Grundstein-legender Prozess für die Fertigung metallischer Komponenten und deren Qualität. Neben den Eisen-Werkstoffen ist der Werkstoff Aluminium (Al) von großer Bedeutung, wird er nach Angaben des Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie für über 85 % der gesamten NE-Metallgussfertigung herangezogen [1]. Zu den Abnehmern von Al-Gussteilen zählen u.a. der Schienenfahrzeugbau, die Elektrotechnik, der Maschinenbau, mit ca. 75 % vor allem aber der Straßenfahrzeugbau [1]. Die Entwicklungen im Bereich Downsizing zur Gewichtsreduzierung der Fahrzeuge wären ohne den Werkstoff Aluminium in dem heute bekannten Umfang kaum möglich gewesen. Um den zunehmend steigenden Ansprüchen an Al-Legierungen Rechnung zu tragen, werden sowohl prozess- als auch werkstofftechnisch Maßnahmen ergriffen, um eine höchstmögliche Schmelzequalität zu erreichen. Dabei stehen gemeinhin zwei Ziele im Fokus der Bemühungen:

- **Reduzierung des Wasserstoffgehaltes:** Al-Schmelzen weisen eine temperaturabhängige Affinität zur Absorption von in der Atmosphäre gebundenem Wasserstoff (H) auf. Im schmelzflüssigen Zustand des Metalls liegt der Wasserstoff darin gelöst vor. Im Zuge der Abkühlung wird jedoch ein Temperatur-Schwellwert erreicht, ab welchem die Löslichkeit des Wasserstoffs innerhalb der Schmelze abrupt sinkt. Infolgedessen diffundiert dieser aus der Schmelze heraus und schlägt sich als Gasporosität (Fehlstellen) nieder, die die (mechanische) Qualität der Gussteile in vielen Fällen beeinträchtigt. Die Reduzierung des H-Gehaltes stellt somit eines der zentralen Ziele der Schmelzebehandlung dar [2].
- **Realisierung eines feinen Gefüges:** Eine möglichst hohe Gussteilqualität in Form hoher mechanischer Eigenschaften wie der Zugfestigkeit erfordert die Realisierung eines feinen Gussteilgefüges. Am Beispiel einer untereutektischen Legierung erstarrt das Aluminium in Form von Dendriten, während die Hauptlegierungselemente häufig eigene Phasen bilden. Ziel ist es, sowohl möglichst kleine Dendriten als auch feine Sekundärphasen im Gussteil zu erzeugen. Da ein direkter Zusammenhang zwischen der Erstarrungszeit, dem damit verbundenem Zeitfenster für das Wachstum von Dendriten und Phasen sowie den damit einhergehenden mechanischen Eigenschaften besteht, ist die Erreichung dieses Ziels insbesondere bei großvolumigen Gussteilen herausfordernd [2].

Zu den in der betrieblichen Praxis etablierten Verfahren zur Reduzierung des Wasserstoffgehaltes zählen die Rotorentgasung, häufig unter Verwendung von Argon zur Bindung des in der Schmelze gelösten Wasserstoffs, und der Einsatz chemischer Reinigungstabletten. Ein feinkörniges Gefüge und feine Sekundärphasen werden mit Hilfe der sog. Kornfeinung und Veredelung erreicht [3]. Alle Verfahren haben gemein, dass der Schmelze meist chemische Fremdstoffe zugeführt werden, um die gesteckten Ziele zu erreichen.

Die Ultraschallbehandlung (USB) stellt aufgrund ihres rein physikalischen Wirkprinzips und den mit ihr einhergehenden Effekten der Kavitation und akustischen Strömung (AS) eine umweltfreundlichere Alternative zu den bestehenden Verfahren dar, da der Einsatz von Fremdstoffen nicht zwingend erforderlich ist. Neben der Reduzierung des Wasserstoffgehaltes innerhalb der Schmelze erlaubt sie auch die Modifizierung des Gussteilgefüges, was wiederum in verbesserten mechanischen Eigenschaften resultiert. Die USB von Eisenwerkstoffen (FE) wird ebenfalls untersucht, ist aufgrund des höheren Temperaturregimes jedoch deutlich herausfordernder. Der Großteil der Aktivitäten konzentriert sich daher auf Leichtmetalllegierungen, vorrangig Aluminium, mit den verschiedensten Zielstellungen [4].

Anwendungsbeispiele

Der Einsatz der USB in der Gießereiindustrie setzt in aller Regel den Einsatz eines im Grundaufbau in Abbildungen 1 dargestellten Systems voraus.

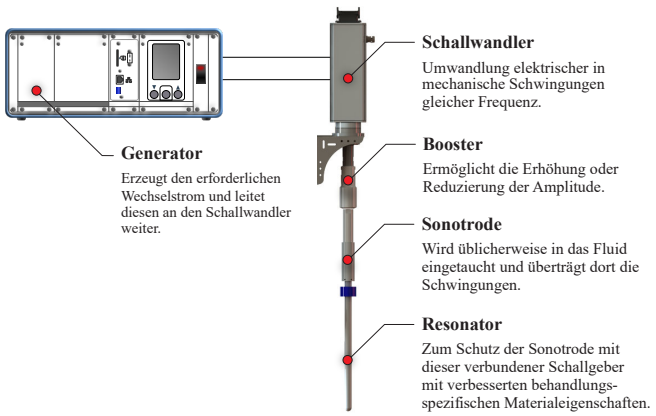

Abbildung 1: Grundaufbau eines Ultraschallsystems für die Applikation in der Gießereiindustrie.

Die Sonotrode wird meist direkt, häufig auch ein an die Sonotrode angeschlossener Resonator, in die Schmelze eingetaucht und überträgt dort die hochfrequenten Schwingungen mit den bekannten Effekten der Kavitation - im Fall von Al-Schmelzen mit Wasserstoff gefüllte Kavitationsbläschen - und akustischen Strömung. Die Behandlung kann hierbei isotherm oder erstarrungsbegleitend erfolgen. Die erstarrungsbegleitende USB dient häufig dazu, mit Hilfe der Kavitationseffekte bzw. den dabei auftretenden Kollapsen wachsendes Gefüge zu zerschlagen oder gemeinhin zu modifizieren. Behandlungen mit diesem Ziel können auch isotherm unterhalb der sogenannten Liquidustemperatur, unterhalb derer der Erstarrungsvorgang einsetzt und das Gefüge entsteht, erfolgen. Die akustische Strömung dient dazu, die erzeugten Gefügefragemente oder sonstige Partikel in der Schmelze zu verteilen. Beispiele für die mittels USB erzielbaren Gefügemodifikationen sind für einen NE- wie auch für einen FE-Werkstoff in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt.

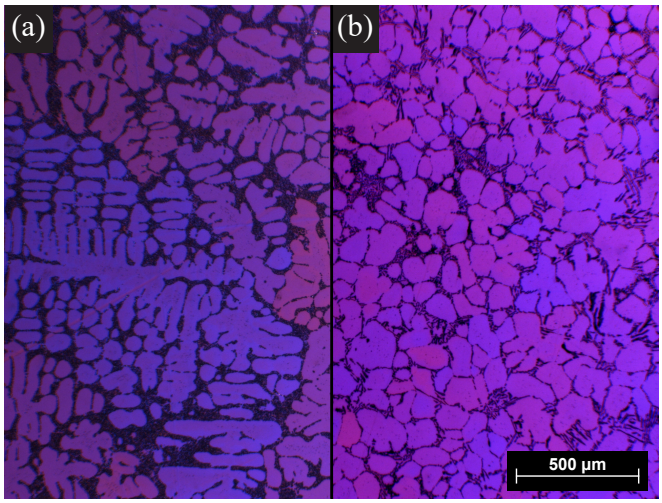

Abbildung 2: Gefüge einer AlSi7Mg0,3 Aluminiumlegierung: (a) ohne USB - ausgeprägt dendritisches Gefüge, (b) mit erstarrungsbegleitender USB - globulitisches Gefüge [5].

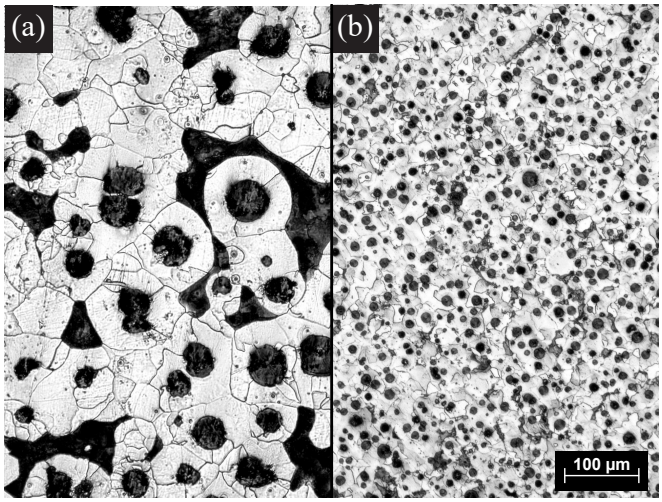

Abbildung 3: Gefüge von Gusseisen mit Kugelgraphit: (a) ohne USB - Graphitkugelanzahl: 270/mm^2, (b) mit erstarrungsbegleitender USB - Graphitkugelanzahl: 2.000/mm^2 [6].

Die Entgasung von Aluminiumschmelzen bspw. erfolgt meist isotherm in Warmhalteöfen, kann bei ausreichend langsamer Temperaturabnahme jedoch auch oberhalb der Liquidustemperatur simultan zur Abkühlung erfolgen. Der Einfluss einer derartigen Behandlung kann Abbildung 4 entnommen werden.

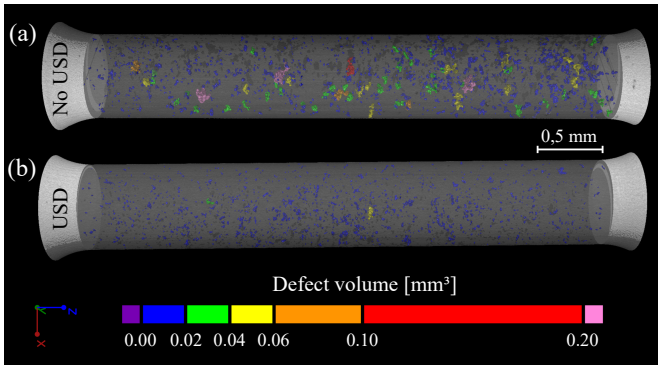

Abbildung 4: CT-Untersuchung von Proben einer AlSi7Mg0,3 Aluminiumlegierung: (a) ohne USB - summiertes Probenvolumen 4,6 mm^2 (b) USB mit dem Ziel der Entgasung - summiertes Probenvolumen 2,2 mm^2 (-53 %) [7].

Numerische Simulation

Neben der geringen Größe der Kavitationszone, die für die Behandlungseffekte der USB maßgeblich verantwortlich ist, stellt die herausfordernde numerische Simulation der Ultraschallbehandlung mit ihren zahlreichen, gleichzeitig auftretenden Effekten einen der Hauptgründe für den limitierten Einsatz der Ultraschallbehandlung in der Gießereiindustrie dar. Ohne numerische Vorbetrachtungen sind jedoch eine moderne Prozessentwicklungen und -Auslegungen nicht denkbar. Entsprechend hoch sind die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der numerischen Simulation der Ultraschallbehandlung von Metallschmelzen. Viele Fortschritte auf diesem Gebiet forcieren allerdings nur einen der genannten Effekte oder lediglich zweidimensionale Ansätze. Lösungen, die eine ganzheitliche und dazu noch dreidimensionale Berechnung ermöglichen, sind rar [8].

Unter Verwendung der im Bereich F&E der Gießereiindustrie etablierten CFD-Software FLOW-3D der Firma Flow Science, Inc. (Santa Fe, NM, US) wurden am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) umfassende Untersuchungen durchgeführt, inwieweit die Simulation der Ultraschallbehandlung möglich ist. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse wurden mit einer Frequenz f = 20 kHz und einer Amplitude A = 35 μm erzielt.

Kavitation:

Die Berechnung der Kavitationszone sowie ihrer Entstehung kann im speziellen bei der Auslegung geeigneter Sonotrodengeometrien, des daraus resultierenden effektiven Behandlungsbereiches sowie für ein besseres Verständnis auftretender materialspezifischer Dämpfungseffekte hilfreich sein. Abbildung 5 veranschaulicht die mittels Simulation berechnete Entwicklung der Kavitationszone auf

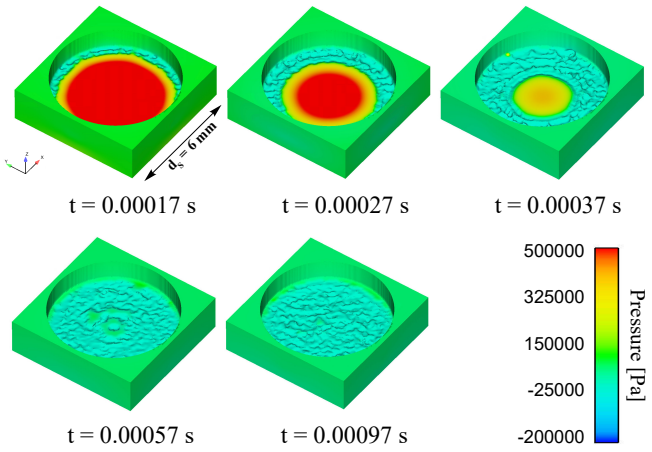

Abbildung 5: Berechnete Entstehung der Kavitationszone in Al-Schmelze auf der flachen Stirnfläche einer Sonotrode innerhalb der ersten 0,001 s.

der Stirnfläche einer Sonotrode. Dabei wird deutlich, dass der von der Sonotrode auf das Fluid ausübbare Druck durch die ausgebildete Kavitationszone gedämpft wird. Zudem können stark von Kavitation betroffene Bereiche im Vorfeld ermittelt und somit erosionsgefährdete Regionen identifiziert werden. Mit Hilfe der eingesetzten Software ist zudem die Ermittlung des Einflusses der Sonotrodengeometrie auf die Kavitationsintensität relativ zueinander möglich, wie Abbildung 6 zeigt.

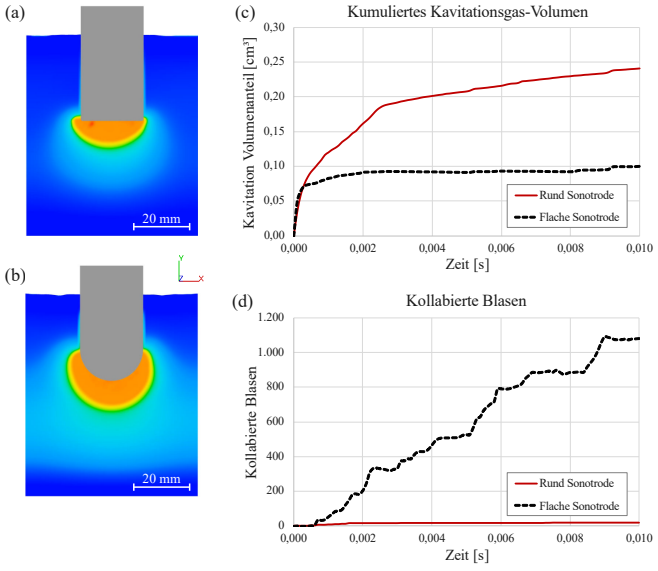

Abbildung 6: Einfluss der Sonotrodengeometrie auf das Kavitationsvolumen und die Kollapsaktivität: (a) Sonotrode mit flacher Stirnfläche, (b) Sonotrode mit sphärischer Stirnfläche, (c) kumuliertes Kavitationsgas-Volumen, (d) Kollapsaktivität.

Akustische Strömung:

Neben der Berechnung der Kavitation ist vor allem auch die Prognose der sich einstellender akustischer Strömung von entscheidender Bedeutung bei der USB von Metallschmelzen. Die Intensität der AS beeinflusst direkt, in welchem Umfang durch die Kavitationszone erzeugte Gefügefragmente im Fluid-/Schmelzevolumen verteilt werden oder aber auch mit welcher Effizienz mit Wasserstoff gefüllte Kavitationsblasen aus der Schmelze an die Oberfläche transportiert werden. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der numerischen Berechnung der AS in Al-Schmelze.

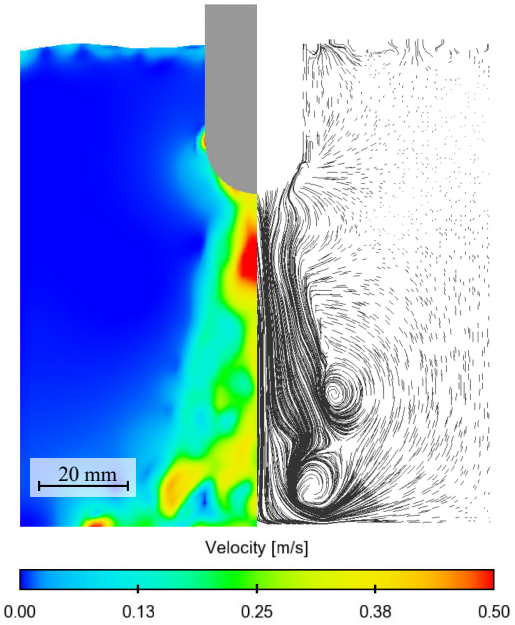

Abbildung 7: Berechnung akustischer Strömung, links Auswertung nach der Geschwindigkeitsverteilung, rechts Stromlinienauswertung.

Die Validierung der Ultraschallbehandlung in Metallschmelzen gestaltet sich aufgrund der hohen Temperaturen und der nicht vorhandenen Transparenz als besonders herausfordernd. Aus diesem Grund werden stellvertretend transparente Fluide wie Wasser oder Glycerin mit möglichst ähnlichen Eigenschaften zur Validierung der Modelle herangezogen. Abbildung 8 zeigt die Gegenüberstellung des Simulationsergebnisses der Ultraschallbehandlung von Glycerine (links) und der realen Messung (rechts).

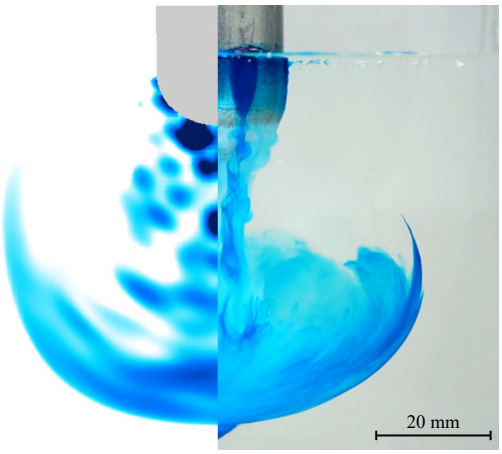

Abbildung 8: Gegenüberstellung der numerischen Simulationsergebnisse der USB von Glycerin (links) und der experimentellen Validierung (rechts).

Schmelzebehandlung:

Die Zusammenführung der USB und gießtechnologischer Prozesse im Rahmen der numerischen Simulation ist aufgrund der hohen Zahl zu berechnender Modelle herausfordernd, mit der eingesetzten Software jedoch möglich. Abbildung 9 zeigt im Zuge einer erstarrungsbegleitenden USB den Einfluss der AS auf die Wärmeverteilung und Erstarrung eines einfachen Gussteils.

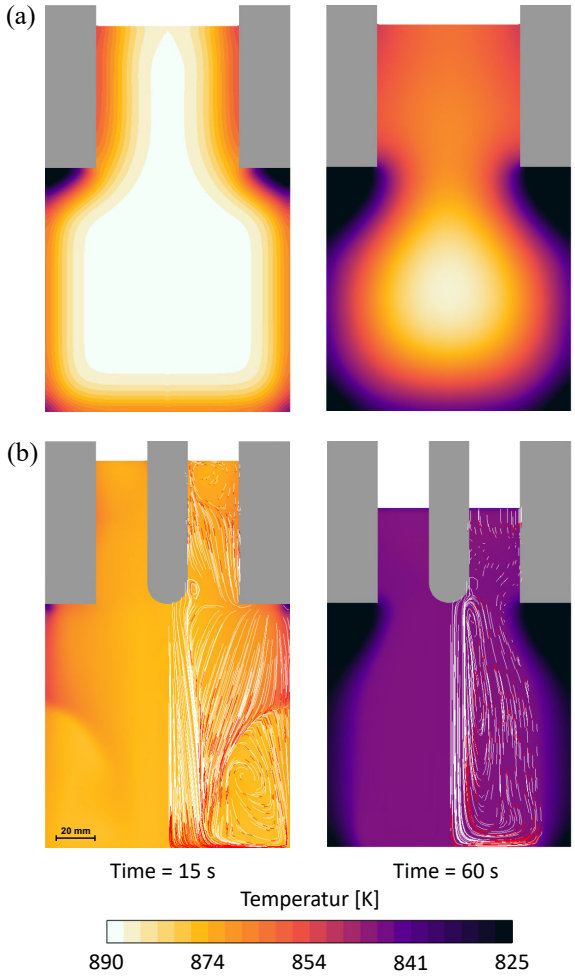

Abbildung 9: Ergebnisse der Simulation ohne und mit erstarrungsbegleitende USB, primär AS: (a) ohne Ultraschall, (b) mit Ultraschall.

Die Berücksichtigung des Einflusses der Kavitation auf das Gussteilgefüge stellt sich als schwieriger dar, kann jedoch über eine empirisch Gewichtung des für das betrachtete Volumen berechneten Kavitationsaufkommens ermittelt werden. Auf diese Weise ist die Prognose des Einflusses der USB auf das Gussteil sowohl unter Berücksichtigung der AS (direkt) als auch der Kavitation (indirekt) möglich.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Ultraschallbehandlung stellt aufgrund ihres rein physikalischen Wirkprinzips gegenüber industriell etablierten Verfahren eine umweltfreundliche Alternative zur Behandlung metallischer Schmelzen, vorrangig von Leichtmetallen, mit dem Ziel einer Qualitätssteigerung der zu fertigenden Gussteile dar. Zahlreiche über die letzten Jahre publizierte Ergebnisse belegen dies. Gleichzeitig sieht sie sich im industriellen Kontext mit Herausforderungen konfrontiert; allen voran mit der limitierten Größe der Kavitationszone und somit der primären Behandlungszone, jedoch auch mit der numerischen Prozesssimulations. Dabei könnte gerade Letztere zu einer effizienteren Auslegung des Prozesses, bspw. in Form von Sonotrodengeometrie und daraus hervorgehenden Kavitationszone, beitragen. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen das Resultat der numerischen Prozesssimulation der USB im gießtechnologischen Kontext. Das hier vorgestellte Gesamtmodell erlaubt die Berechnung von Kavitation, AS sowie deren Einfluss auf das Gussteilgefüge und bietet somit einen ganzheitlichen Ansatz. Obwohl die Ergebnisse bis zu Ihrer Validierung in jedem Fall kritisch zu betrachten und die Modelle stets weiterzuentwickeln sind, erlauben sie wichtige Einblicke in die Behandlungsmechanismen. Die Anpassung von (Sonotroden-)Geometrien und Fluidparametern sind problemlos möglich und erlauben somit einen flexiblen Einsatz der Software und des Modells, auch für zukünftige Anwendungen wie der Herstellung partikelverstärkter Werkstoffe [9] oder die Wasserstoffproduktion [10].

Literatur

[1] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e. V., URL: `https://www.guss.de/`

[2] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2014

[3] Bührig-Polaczek, A., Michaeli, W., Spur, G.: Handbuch Urformen. Hanser Verlag, München, 2014

[4] Eskin, G., Eskin, D.: Ultrasonic treatment of light alloy metals. CRC Press, Boca Raton FL, 2015

[5] Riedel, E., et al.: Ultrasonic treatment: a clean technology that supports sustainability incasting processes. Procedia CIRP 80 (2019), 101-107

[6] Ahmed, M., et al.: New Ultrafine austempered ductile iron alloys using ultrasonic melt treatment. Giesserei-Special 107 (2020), 26-34

[7] Riedel, E., et al.: Industrial suitable and digitally recordable application of ultrasound for the enviromentally friendly degassing of aluminium melts before tilt casting. Procedia CIRP 98 (2021), 589-594

[8] Eskin, D., et al.: Ultrasonic melt processing: achievements and challenges. Materials Science Forum 828-829 (2015), 112-118

[9] Paul, T., et al.: Analytical review of reinforcement addition techniques during ultrasonic casting of metal matrix composites. Advanced Engineering Materials 22 (2020), 2000524

[10] Rashwan, S., et al.: Development of efficient sonoreactor geometries for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 46 (2021), 15219-15240