Optimierte Prozessketten für das Presshärten

Göschel, A.; Schieck, F.; Rautenstrauch, A.; Schönherr, J.

Abstract

Die Optimierung der Prozesskette Presshärten stellt aus Sicht des wachsenden Bedarfes an hochfesten warmumgeformten Blechbauteilen und den stetigen Bestrebungen hinsichtlich einer hohen Energie- und Ressourceneffizienz der Prozesskette eine komplex und vielschichtige Aufgabenstellung dar. Der vorliegende Beitrag soll mögliche Optimierungspotenziale in der Prozesskette des Presshärtens aufzeigen und erste Umsetzungsvarianten darlegen.

1 Motivation

Seit Mitte der 1980er Jahre werden einzelne warmumgeformte, sicherheitsrelevante Bauteile wie Seitenaufprall- und Stoßfängerquerträger eingesetzt. Der damit beginnende Trend, höchstfeste Werkstoffe in innovativen Karosseriekonzepten einzusetzen, ist seit dem ungebrochen (Bild 1). Die Anzahl an produzierten, warmumgeformten Bauteilen erhöhte sich von 3 Millionen Bauteile pro Jahr im Jahre 1987 auf bis zu 8 Millionen Bauteile. Prognosen gehen davon aus, dass die Produktion von höchstfesten Karosseriebauteilen bis 2015 auf circa 250 Millionen Bauteile pro Jahr ansteigt [1].

Um dieser rasanten Entwicklung technologisch gewachsen zu sein, müssen prozesssichere und praxistaugliche Fertigungsstrategien entwickelt werden. Ein Erfolgsbeispiel hierfür ist das Umformverfahren Presshärten, welches die Formgebung und die Wärmebehandlung des Blechbauteils in einem Prozessschritt vereint. Allein durch den Einsatz von pressgehärteten Karosseriebauteilen kann bei einem Mittelklassefahrzeug bis zu 20 kg Material eingespart werden [2].Dies senkt einerseits in der Fahrzeugherstellung den Bedarf an Stahl um circa 68 kg pro Rohkarosserie und andererseits in der Nutzungsphase den Kraftstoffverbrauch um circa 0,1 Liter pro 100 Kilometer [3]. Um diese aufgezeigten Potenziale des Presshärtens

auszuschöpfen, müssen verschiedenste fertigungstechnische Herausforderungen bewältigt werden.

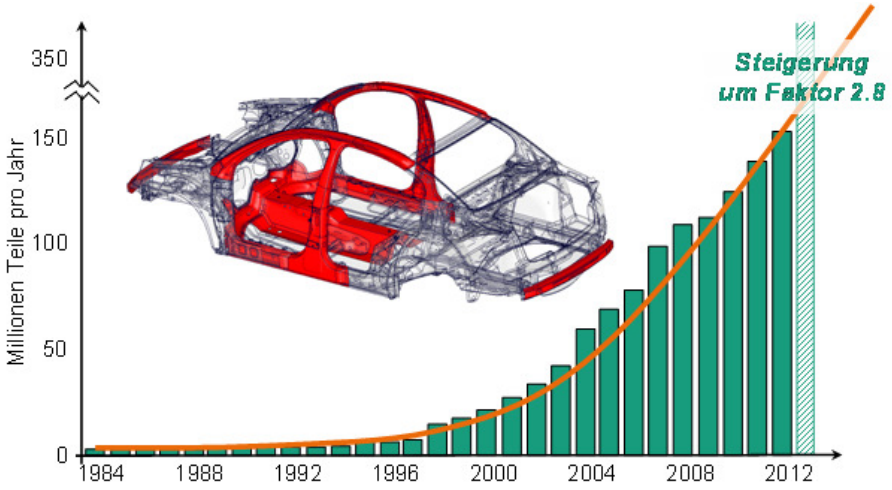


Bild 1: zukünftiger Bedarf an pressgehärteten Bauteilen

Bild 2 zeigt schematisch die direkte Prozesskette zur Herstellung von warmumgeformten Strukturbauteilen auf. Die zugeschnittene Blechplatine aus manganborlegiertem Vergütungsstahl (22MnB5) wird zum Austenitisieren bei ca. 950 °C im Ofen erwärmt. Der Erwärmung schließt sich der Prozessschritt der Blechwarmumformung in einem gekühlten Werkzeug, das sogenannte Press- bzw. Formhärten, an. Die dabei erforderliche hohe Abkühlrate von mindestens 27 K/s hat ein Härten durch die Umwandlung in martensitisches Gefüge zur Folge. Die Bauteile erhalten dadurch je nach Materialeinsatz eine Zugfestigkeit von 1000 bis 1900 N/mm². Die Endgeometrie der Presshärtebauteile wird in einem abschließenden Prozessschritt mittels mechanischem Schneiden (Hartbeschnitt) oder Laserstrahlschneiden hergestellt.

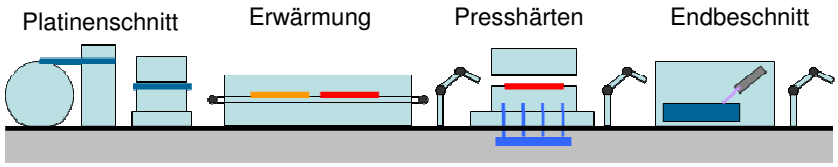


Bild 2: ***Prozesskette - direktes Presshärten***

2 Optimierungspotenzial - Chancen und Herausforderungen

Aus den Vorzügen des Presshärtens wie der großserientaugliche Leichtbau, die verbesserte Crashperformance und die Möglichkeit maßgeschneiderte Bauteileigenschaften einzustellen, leiten sich auch Herausforderungen ab. So ergeben sich neben der technologischen Prozessoptimierung, der Gestaltung der Umformwerkzeuge und der thermo-mechanischen FE-Simulation auch offene Fragestellung hinsichtlich der Tribologie und der Energie- und Ressourceneffizienz.

Durch die Fokussierung auf die oben genannten Optimierungsziele in der Blechwarmumformung ergeben sich neue technologische Herausforderungen, die es unter den charakteristischen Ansatzpunkten zu lösen gilt:

1. Realisierung einer **Nullfehlerproduktion** z. B. hohe Prozesssicherheit, Ermittlung geeigneter Prozessfenster
2. Reduzierung des **Ressourceneinsatz**es z. B. optimierte Bauteilgeometrie, verminderter Schmierstoffeinsatz
3. Energieeffiziente Werkzeug-, Maschinen- und Anlagentechnik z. B. Einsatz von Maschinen mit **geringer Grundlast**, intelligente Werkzeugtechnik
4. Reduzierung der Verluste z. B. Erhöhung des **Materialausnutzungsgrades**, Nutzung von Abwärme
5. Optimierung der **Taktzeit** z. B. Verringerung der Stillstandszeiten, Einsatz von Mehrfachwerkzeugen

Diese Verbesserungsansätze können durch verschiedene technologische Maßnahmen oder durch innovative Forschungsansätze realisiert werden.

3 Umsetzung der Prozessoptimierung

Das vorliegende Kapitel stellt sich den Herausforderungen des Presshärtens von Seiten der Prozessführung, der Werkzeuggestaltung, der thermo-mechanisch gekoppelten Simulation, der Tribologie und nicht zuletzt der Energie- und Ressourceneffizienz und zeigt die entwickelten Lösungsansätze auf.

3.1 Blechwarmumformung

3.1.1 Thermomechanische Kennwertermittlung für die technologische Prozessgestaltung

Die Auslegung der Prozesskette der Blechwarmumformung erfolgt durch die Ermittlung der thermomechanischen Kennwerte. Ziel ist es neben der Reduzierung der Prozesstemperatur die Prozesszeit zu verkürzen und die Prozessgrenze mit erhöhter Prozessstabilität zu ermitteln. Die thermomechanischen Grundlagenuntersuchungen werden in Variation verschiedener Parameter wie zum Beispiel Umformtemperatur, Umformgrad, Aufheizrate, Abkühlrate, Austenitisierungstemperatur und Prozesszeiten durchgeführt. Dadurch wird der Einfluss der verschiedenen Faktoren auf den Prozess dargestellt und das Prozessfenster in Abhängigkeit der einzustellenden Bauteileigenschaften festgelegt.

Die dilatometrischen Untersuchungen bilden die Basis der thermomechanischen Analysen. Neben der Ermittlung einer prozesssicheren Erwärmungstemperatur zur Austenitiserierung des eingesetzten Werkstoffes geben die Untersuchungen Aussagen über Einstellungen von bauteilspezifischen Eigenschaften. Die Bestimmung der Austenitisierungstemperatur erfolgt in einem Abschreck- und Umformdilatometer bei verschiedenen Aufheizraten von 1 K/s bis 300 K/s, wobei die aufgenommenen Längenänderungen der Proben Auskunft über den Beginn der Austenitumwandlung A_{c1} und das Ende der Austenitumwandlung A_{c3} gibt. Die Ergebnisse werden in einem Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-(ZTA-)Diagramm zusammengefasst (Bild 3 links).

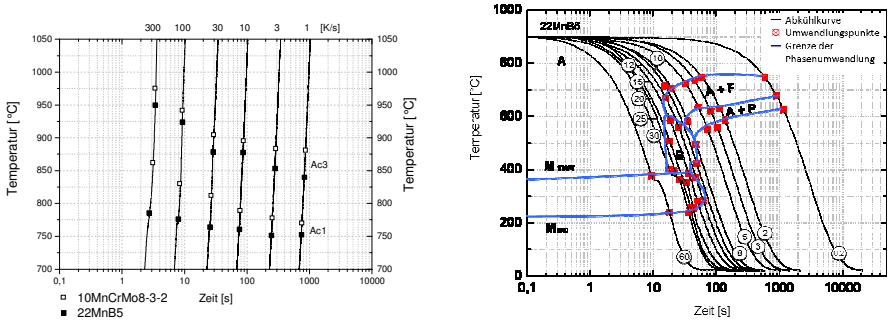


Bild 3: Thermomechanische Untersuchung; links: ZTA-Diagramm - Werkstoff 22MnB5 + 10MnCrMo8-3-2; rechts: ZTU-Diagramm - Werkstoff 22MnB5

Die Einstellung der bauteilspezifischen Eigenschaften kann in der Blechwarmumformung über die Abkühlrate erfolgen. Hierzu ist das Zeit-Temperatur-Umwandlung-(ZTU-)Diagramm hilfreich (Bild 3 rechts). Dieses wird wie das ZTA-Diagramm mit dilatometrischen Untersuchungen ermittelt, indem die Proben zunächst austenisiert und nach einer vorgegebenen Haltezeit bei verschiedenen Raten 0,2 K/s bis 60 K/s abgekühlt werden. Die wärmebehandelten Proben werden im Nachgang auf deren mechanischen Kennwerte hin untersucht, welche für die Rückschlüsse auf die bauteilspezifischen Eigenschaften dienlich sind [4].

3.1.2 Thermodynamische FE-Simulation zur Werkzeugauslegung

Zur Bewertung der Formänderungsanalyse unter den komplexen Einflüssen wie der Temperatur, Umformgeschwindigkeit, Wärmeübergang und Materialverhalten im Presshärteprozess wird die Methodenplanung herangezogen, die durch eine thermomechanische Simulation unterstützt wurde. Diese dient neben der Prozessplanung auch der Werkzeugauslegung. Die Berechnungsergebnisse wurden hinsichtlich der Blechdickenverteilung, Faltenbildung, Umformbarkeit ausgewertet (siehe Bild 4) und für die Prozess- sowie der Werkzeugauslegung herangezogen.

Zur Beschreibung des Temperaturmanagements im Umformwerkzeug wurden Berechnungen mit verschiedenen thermischen Randbedingungen wie Abkühlgeschwindigkeit, Werkzeugtemperatur T_t und dem Wärmeübergangskoeffizient h durchgeführt. Zur Auslegung der Kühlsysteme im Umformwerkzeug (siehe Bild 5) wurden die Kühlkanäle auf der linken Seite mit Wasser (20 °C) gekühlt, während die Kühlkanäle auf der rechten Seite ausgeschaltet oder mit warmem Öl aufgeheizt wurden, damit eine lokale Einstellung der Festigkeiten/Zähigkeiten der Bauteile erreicht werden konnte [5].

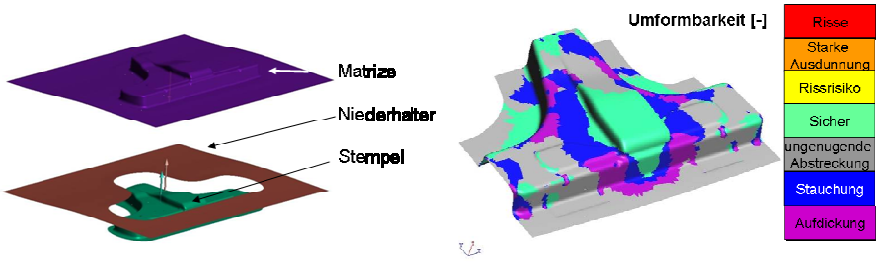


Bild 4: Machbarkeitsanalyse; links: Werkzeugkonzept - Aufbau; rechts: AutoForm FE – Simulation - Umformbarkeit

Die Simulationen zeigen, dass die maßgeschneiderten Bauteileigenschaften durch die Werkzeugtemperatur und den Wärmeübergangskoeffizient kontrolliert werden können. In der Realität wird die Werkzeugtemperatur hauptsächlich durch das Kühlsystem geregelt, die von den thermischen Eigenschaften des Werkzeugwerkstoffes abhängig sind.

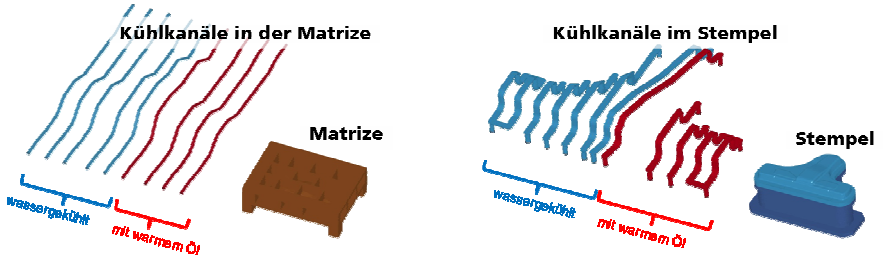
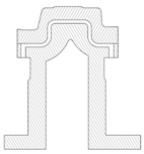


Bild 5: Auslegung des Kühlsystems [5]

3.1.3 Moderne Werkzeuggestaltung

Für die Umsetzung des Presshärtewerkzeuges wurden zwei in der Praxis bevorzugte Kühlkonzepte eingesetzt: Schalenaufbau und eingegossene Kühlkanäle (siehe Bild 6).

Schalenaufbau



Eingegossene Kühlkanäle

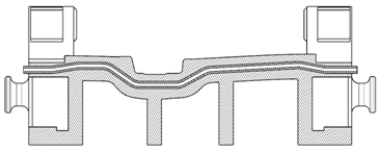


Bild 6: Prinzipdarstellungen der Kühlkonzepte [6]

Die Umsetzung fand in zwei Demonstratorwerkzeugen, dem B-Säulenfuss und dem Sitzquerträger statt. Für den Stempel des Werkzeuges B-Säulenfuß wurde die Schalenvariante und für die Matrize die Variante mit den eingegossenen Kühlrohren

gewählt. Der Stempel besteht demzufolge aus einem Stempelunterbau und einer Stempelschale. Als Material wurde für beide Komponenten ein Sphäroguss gewählt (EN-JS1070 – GGG70). Die Matrize wurde ebenfalls aus dem EN-JS1070 im Gussverfahren hergestellt. Die eingegossenen Kühlrohre wurden aus dem Edelstahl 1.4571 gefertigt.

Modellbau



Werkzeugbau

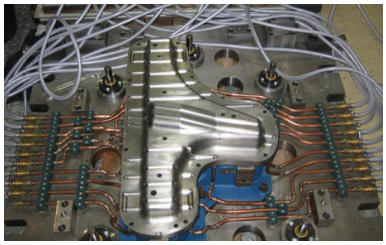


Bild 7: Realisierung des Demonstratorwerkzeuges am Beispiel des B-Säulenfußes

Die Schmelztemperatur des eingesetzten Edelstahles liegt mit ca. 1.500 °C über der Schmelztemperatur des eingesetzten Gusswerkstoffes. Nur unter dieser Voraussetzung kann sichergestellt werden, dass die Rohre im Gussprozess nicht kollabieren. Die Kühlung im Stempel und in der Matrize besteht aus mehreren einzelnen Kühlkanälen, welche alle separat angesteuert werden können. Dies ermöglicht zum einen eine exaktere Steuerung der Kühlung und zum anderen eine homogenere Kühlung durch das Gegenstromprinzip.

3.1.4 Tribologisches Prozesssystem

Die Werkzeugtribologie ist eine Prozessstellgröße mit großem Einfluss auf die Prozessstabilität. Zum einen bestimmt der Reibungskoeffizient zwischen Werkzeug und Blech über das Umformergebnis, d. h. ob ein Gutteil erhalten wird oder Werkstückversagen auftritt. Des Weiteren ist ein Ziel der tribologischen Untersuchungen das Erreichen einer Standzeitverlängerung der Werkzeuge, um Wartungsintervalle zu vergrößern und damit regelmäßige Produktionsstopps zu vermeiden. Ein in diesem Zusammenhang häufig auftretendes Problem in der Serienfertigung ist das Anhaften der AlSi-Blechbeschichtung auf der Werkzeugoberfläche.

Die entscheidenden Verschleißmechanismen beim Presshärten sind zum einen Ermüdungserscheinungen durch thermische Wechselbeanspruchungen, die sich in Ausplatzungen und Rissbildung äußern können. Bei Adhäsionserscheinungen ist zu beobachten, dass sie mit steigenden Prozesstemperaturen zunehmen. Abrasion, durch Verschleißpartikel der Werkstückbeschichtung ausgelöst, kann sowohl vermehrt auftreten, als auch – aufgrund kleinerer Umformkräfte – abnehmen. Des Weiteren bewirken die hohen Temperaturen Gefügeumwandlungen und Diffusionsvorgänge in Werkzeugwerkstoff und Beschichtung. Auswaschungen, die ein Zeichen für die Herabsetzung des Verschleißwiderstands sind, sind Anzeichen einer derartigen lokalen Werkstoffbeeinflussung [[7].

Mit dem temperierten Streifenziehversuch mit 90° Umlenkung und Plastifizierung des Blechwerkstoffes wurden drei Hartstoffschichten sowie ein unbeschichteter Werkzeugstahl für die Eignung für Presshärtewerkzeuge appliziert. Die Versuche, unter Verwendung von jeweils fünf Blechstreifen der Werkstoffe 22MnB5, 22MnB5+AlSi, 22MnB5+x-tec, wurden mit folgenden PVD-Beschichtungen für die Ziehkante durchgeführt: CrVN, TiNbAlN und TiZrCrN.

Die Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen machen deutlich, dass durch den Einsatz von PVD-Beschichtungen ein Aufschweißen des unbeschichteten 22MnB5 auf das Werkzeug vermieden werden kann. In diesem Fall wird mit den verwendeten Hartstoffbeschichtungen eine Verbesserung der Bauteilqualität erreicht und zugleich die Werkzeugoberfläche geschützt.

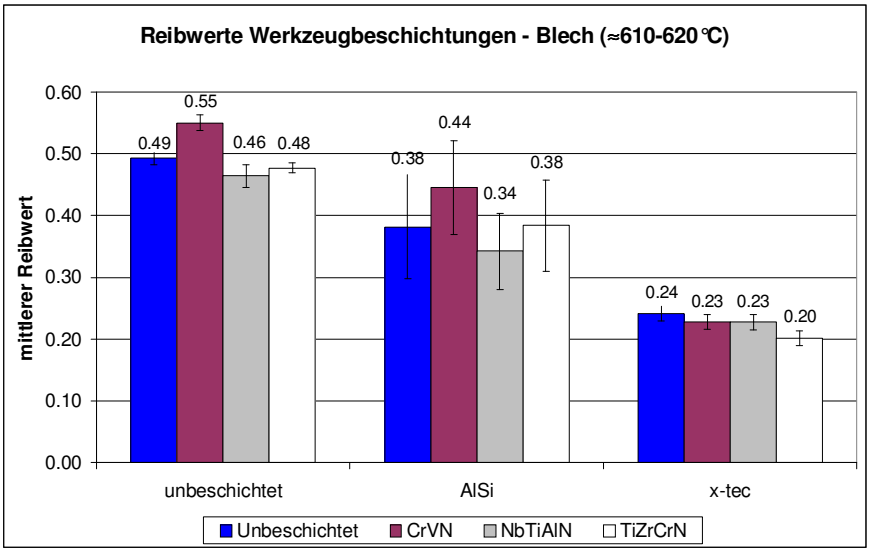


Bild 8: Reibwerte der Werkzeugbeschichtungen in Kombination mit dem unbeschichteten 22MnB5 und 22MnB5+x-tec

Die Reibwerte bleiben durch die Werkzeugbeschichtung, unabhängig vom verwendeten Blechwerkstoff, nahezu unbeeinflusst (Bild 8). Jedoch kann durch die Änderung der Beschichtung des Blechausgangsmaterials entscheidend der Prozess beeinflusst werden, indem beispielsweise durch Verwendung von x-tec beschichtetem Blech einer Rissbildung bei der Warmumformung vorgebeugt werden kann.

3.1.5 Energie- und Ressourceneffiziente Prozessbetrachtung

Zur quantitativen Bewertung der Prozesse und Prozessketten hinsichtlich Energie- und Ressourceneffizienz wurde eine Methode entwickelt die Prozedur für Energie- und Materialflussbilanzierung (PEMB). Diese Methode ermöglicht die Vergleichbarkeit von Prozess- und Prozesskettenvarianten und somit die Planung sowie Gestaltung von energie- und ressourcensensitiven Prozessen bzw. Prozessketten.

Die Methode setzt sich aus drei Teilen zusammen: dem Erfassen bzw. Abbilden, dem Bilanzieren und im dritten Teil dem Bewerten. Das Erfassen und Abbilden von Prozessen bzw. Prozessketten erlaubt einerseits die Visualisierung von Energie- und Materialflüssen (siehe Bild 9) und andererseits die systematische Beschreibung aller beteiligten Prozesselemente wie zum Beispiel Rohstoffen, Hilfsstoffen, Ma-

schinen und Anlagen oder elektrischer Energie. Mit Hilfe von verfahrensspezifischen Prozessbilanzen werden der Energie- und Materialbedarf berechnet und durch repräsentative Kennzahlen vergleich- und nachvollziehbar ausgedrückt. Im letzten Teil der Methode werden die erstellten Prozessbilanzen bewertet, wobei Verbesserungsansätze detektiert und quantifiziert werden können. Darauf aufbauend können Verbesserungsmaßnahmen angeleitet als auch energie- und ressourcensensitive Prozessparameter ermittelt werden [8].

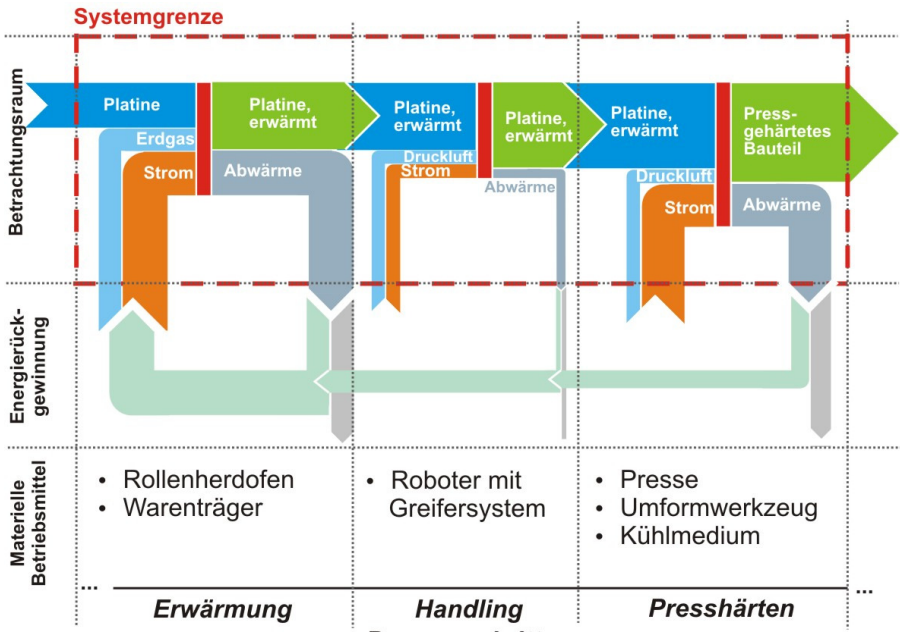


Bild 9: Energie- und Materialfluss beim Presshärten (exemplarisch)

3.2 Wirkmedienbasiertes Presshärten

3.2.1 Thermo-mechanisch gekoppelte FE-Simulation des Umformprozesses

Zur simulationsgestützten Prozessauslegung für konkrete Versuchsgeometrien wurden entsprechende thermo-mechanische 3D-Modelle erstellt, welche die physikalischen Phänomene der Konvektion, Wärmeleitung, Wärmestrahlung und des

Wärmeübergangs zur Berechnung der Temperaturfelder in Platine und Werkzeug berücksichtigen. Durch die Auswahl repräsentativer Versuchsgeometrien mit signifikanten geometrischen Merkmalen (Verprägungen, Expansionsbereiche, kleine Radien) konnten in Verbindung mit der Variation von Wanddicken und Prozessparametern (Umformdruck, Umformgeschwindigkeit) die Umformgrenzen und die thermischen Verhältnisse in Bauteil und Werkzeug berechnet werden.

Der zeitliche und räumliche Temperaturverlauf stellt innerhalb des Presshärtevorganges die elementare Größe für den durch die Gefügeumwandlung bedingten Härteprozess dar. Daher ist es von wesentlicher Bedeutung, die thermische Interaktion zwischen Werkzeug und Bauteil über die gesamte Umformzeit hinweg möglichst exakt beschreiben zu können.

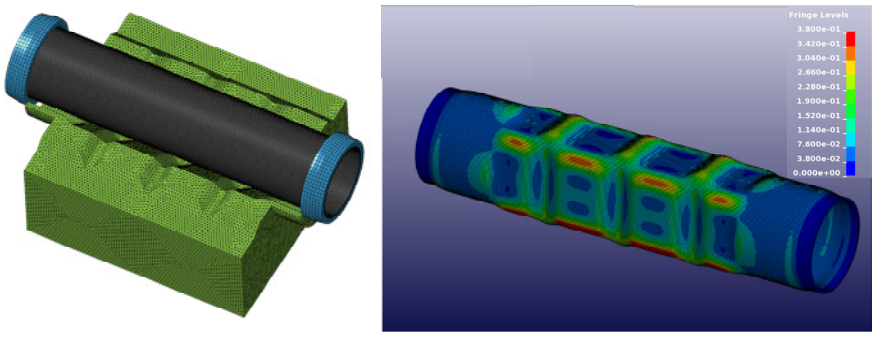


Bild 10: Thermo-mechanical coupled FE-Simulation of test geometry „Crashbox“ [9]

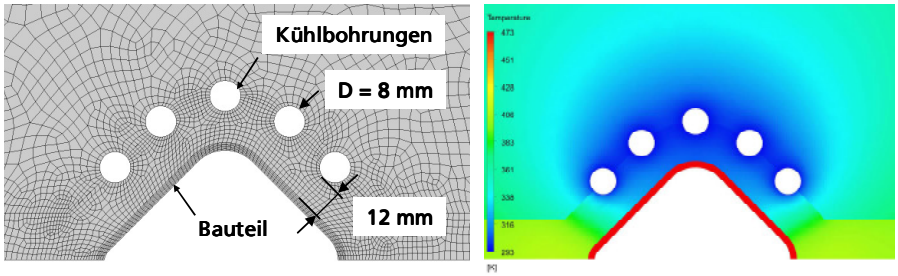
Die im Ergebnis der thermo-mechanisch gekoppelten FE-Simulation vorliegende zeitliche Änderung der Temperaturverteilung bildet im Weiteren die Grundlage für die Auslegung der Werkzeugkühlung auf Basis einer Kühlsimulation [9].

3.2.2 Simulationsgestützte Auslegung und Optimierung der Werkzeugkühlung

Theoretische und experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass beim Presshärten mit Wirkmedien ausreichend hohe Abkühlraten zur Einstellung eines martensitischen Gefüges über die Kontaktkühlung zur Werkzeugoberfläche erreicht werden können.

Für den Versuchsbetrieb mit geringen Taktzeiten von 5 -10 Minuten ist eine aktive Werkzeugkühlung von vernachlässigbarer Bedeutung, da die je Hub zugeführte

Wärmemenge aufgrund der massiven Bauweise der Werkzeuge – analog zu konventionellen Werkzeugen für die Innenhochdruckumformung – absorbiert und ausreichend schnell an die Umgebung abgeführt werden kann. Die Temperatur der Werkzeugaktivteile erreichte unter den genannten Versuchsbedingungen im stationären Zustand Maximalwerte deutlich unter 100 °C.



Vernetzung von Bauteil und Werkzeug

Temperaturverteilung im Werkzeug zu Beginn des Umformvorgangs

Bild 11: 2-D Kühlsimulation einer Testgeometrie [9]

Mit Hinblick auf einen möglichen Serieneinsatz der Technologie mit avisierten Taktzeiten von 30 Sekunden müssen jedoch wesentlich größere Wärmeströme abgeführt werden. Eine aktive Kühlung der Werkzeugelemente zur Begrenzung des Temperaturniveaus auf technologisch erforderliche Werte ist dazu unumgänglich. Darüber hinaus muss eine derartige Werkzeugkühlung ein möglichst homogenes Temperaturfeld in der Aktivteilkontur gewährleisten und konstruktiv und technologisch bedingte unterschiedliche Wärmeströme kompensieren und homogenisieren. Eine zuverlässige Aussage zur Auslegung des Kühlsystems ist durch eine FE-Kühlsimulation zu erreichen. Bild 11 zeigt den Modellaufbau einer 2-D Simulation sowie die Darstellung der Temperaturverläufe.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um den zukünftig großen Bedarf an warmumgeformten Bauteilen zu decken und um den steigenden Ansprüchen in Richtung Energie- und Ressourceneffizienz gerecht zu werden, müssen vielfältigste technologische Herausforderungen gelöst werden. Basis hierfür ist vor allem der Einsatz der thermo-mechanisch gekoppelten

FE-Simulation, die Umsetzung definierter tribologischer Einsatzbedingungen und die quantitative Bestimmung des Energie- und Materialverbrauchs von Prozessen. Zudem leisten innovative Fertigungstechnologien wie z. B. das wirkmedienbasierte Presshärten einen Beitrag zur Erweiterung des Einsatzportfolios von Presshärtebauteilen. Durch die aufgezeigten Grundlagenuntersuchungen hinsichtlich Werkstoff- und Verfahrensparametern sowie durch die Entwicklung von geeigneten Maschinen- und Werkzeugkonzepten werden erste Schritte zur Lösung der fertigungstechnischen Herausforderungen getan. Dies stellt zudem die Ausgangsbasis für aktuell komplexe Themenstellungen wie z. B. Hartbeschnitt von Presshärtebauteilen oder gradierten Presshärtebauteilen dar.

Literaturangaben

[1] Gräbener, L.; Hogele, H.: Aktuelle Trends in der Umformtechnik. In: EFB Hochfeste und hybride Materialien - Schnelle Umform- und Fügeverfahren, Tagungsband T32, Hannover, 2011, ISBN 978-3-86776-363-9, S. 13 - 33

[2] VW AG; Highlights - Leichtbau, Internetartikel, 2011

[3] Klein, B.: Leichtbaukonstruktion, 8. Auflage, Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2009

[4] Neugebauer, R.; Göschel, A.; Rautenstrauch, A.; Meza-Garcia, E.: Influence of the steel alloy composition on phase transitions and its applicability hot forming process. In: Steel Research International - Special Edition of the 10th International Conference on Technology of Plasticity ICTP 2011, Aachen, S. 429-434

[5] Neugebauer, R.; Göschel, A.; Schieck, F.; Rautenstrauch, A.; Mosel, A.; Cai, H.: Enhancement of process stability and part quality for the press hardening of sheet meta, tubes and profiles. In: 3rd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 13th-16th June 2011, Kassel, S. 229-236

[6] Schieck, F.; Hochmuth, C.; Polster, S.; Mosel, A.: Moderne Werkzeuggestaltung zur Bauteilgradierung unter Einbindung von Simulationsmodellen, effizienten Werkzeugkühlkonzepten und Werkzeugbeschichtungssystemen. In: In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovatio-

nen in der Produktionstechnik; Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2010, S. 789-812

[7] Weber, M.: Neue Schichtsysteme für die Umformtechnik. Werkzeugbeschichtungen für die temperierte Umformung. In: Workshop Beschichtete Werkzeuge - höhere Wirtschaftlichkeit in der Ur- und Umformtechnik, Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. -EFDS-, Dresden, 2005

[8] Göschel, A.; Sterzing, A.; Schönherr, J.: Balancing Procedure for Energy and Material Flows in Sheet Metal Forming. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, special issue, vol. 4/2, 2011, S. 170-179

[9] Neugebauer, R.; Werner, W.; Paul, A.; Frank Schieck: Media Based Press Hardening of Tubes – Opportunities and Challenges. In: Proceedings of the 5th International Conference on Tube Hydroforming, TUBEHYDRO2011, 24th-27th July 2011, Noboribetsu (Hokkaido), Japan