

FEM macht geldwerten Nutzen

Nicht nur bei Blech und Antriebsstrang ist Massenminderung angezeigt. In jedem Pkw stecken rund 4000 Federn. Das ist reichlich Sparpotenzial. FEM-Analysen auf Basis der Software Simufact.Forming 10.0 helfen dabei, die Drahtdurchmesser von Schraubenfedern ohne Verlust an Performance zu optimieren. Die Universität Padua hat's vorgerechnet.

Zur Verbesserung der Fahrzeugleistung und insbesondere der Treibstoffeffizienz macht sich die Automobilindustrie als wesentlichen Faktor die Gewichtsreduzierung zunutze. Diese kann bei Fahrwerksfedern durch Verkleinerung des Federdrahtdurchmessers erreicht werden. Um auch weiterhin die erforderlichen mechanischen Eigenschaften zu erfüllen, muss dafür allerdings ein Material mit höherer Festigkeit zum Einsatz kommen. Die erste Automobilschraubenfeder wurde 1910 im T-Modell von Ford eingesetzt. Verglichen mit den damals verwendeten Federn aus Stahl und einer Bruchfestigkeit von 500 MPa, werden in der heutigen Serienproduktion von Fahrwerksfedern Siliziumstähle mit einer Bruchfestigkeit von 1200 MPa eingesetzt. Um den Drahtquerschnitt dabei zusätzlich zu verkleinern und das Gewicht weiter zu reduzieren, müssen die Hersteller von Federn auf hochfeste martensitische Stähle zurückgreifen. Dabei stehen zur Umformung solcher Materialien verschiedene Verfahren zur Verfügung. Zum einen kann das Material bei hohen Temperaturen umgeformt werden, was eine erhöhte Materialformbarkeit und reduzierte Formgebungskräfte zur Folge hat.

Kleinerer Drahtquerschnitt

Zum anderen ermöglicht eine Wärmebehandlung vor dem Umformungsprozess eine bessere Formbarkeit der Feder in einer darauf folgenden Kaltumformung. Damit die benötigte Festigkeit erreicht wird, setzen beide Verfahren voraus, dass die Feder nach der Umformung gehärtet und angelassen wird. Diese abschließende Wärmebehandlung führt in der Produktion zu erheblichem Energie- und Zeitaufwand und nicht zuletzt zu höheren Herstellungskosten.

Die Kaltumformung bietet eine gute Möglichkeit, sowohl das Federgewicht als auch die Produktionszeit zu reduzieren, indem das Material direkt in seinem Endzustand umgeformt wird. In diesem Fall wird ein hochfester martensitischer Stahl verwendet. Aufgrund der geringeren Formbarkeit des hochfesten Materials, gestaltet sich der Wicklungsprozess jedoch problematisch.

Mit einer weiteren Erhöhung der Festigkeit kann es bei der Kaltumformung zu einem Versagen des Drahtes und zu einem Bruch der Feder kommen (Abbildung 1). Die höhere Festigkeit des Materials macht höhere Umformkräfte und in Folge dessen eine höhere Vorschubkraft erforderlich. Durch eine möglichst hohe Reibung können die Vorschubrollen ausreichend Kraft ausüben, um die erforderlichen Tangentialkräfte zu erzeugen und so ein Abrutschen des Drahtes zwischen den Rollen zu vermeiden. Höhere Reibungskräfte in den stationären Formgebungswerkzeugen wie Leitblech, Biegewerkzeug und Axial-Teilungsschiene führen jedoch zu erhöhten Umformkräften.

Als erfolgreich erwies sich hier die Methode, das Biegewerkzeug durch zwei Walzen zu realisieren, um die vorhandene Gleitreibung durch eine Rollreibung zu ersetzen. Für die verbleibenden Komponenten der Maschine sahen sich die Federhersteller jedoch weiterhin vor das Problem der widersprüchlichen Ziele gestellt, die Reibung in den Vorschubrollen möglichst hoch, überall anders jedoch möglichst gering zu halten. Der Einsatz einer Schmierstation zwischen Vorschub und Formgebung könnte zwar Abhilfe schaffen, würde jedoch in industriellen Anlagen zu

starken Verschmutzungen führen, die in einer abschließenden Reinigungsprozedur entfernt werden müssten.

Dies zu vermeiden, bauen die Hersteller auf Drähte mit einer Oxidschicht, die als Festschmierstoff dient. Diese darf nicht zu dünn sein, da sie sonst beim Passieren der Vorschubwalzen brechen und ein Abrutschen des Drahtes zwischen den Vorschubwalzen verursachen kann. Ein solches Abrutschen könnte durch einen höheren Radialdruck der Rollen auf den Draht behoben werden, allerdings besteht hier die Gefahr, dass Schädigungen im Draht entstehen. Um diesen Phänomenen auf den Grund zu gehen, wurden verschiedene Chargen gehärteter Drähte aus 54SiCr6 analysiert und mit den Fertigungsergebnissen der Federherstellung verglichen. Im Fokus der Untersuchungen standen der Einfluss der Reibung und der Aufbau der Wickelmaschine. In letzterer wurden verschiedene Proben des gleichen Stahls mit unterschiedlicher Oxidschicht getestet, die zu einem Großteil eine fehlerfreie Fertigung erlaubten. Bei einigen kam es jedoch während der Wicklung zu einem Bruch der Feder. Ein Draht, bestehend aus einem hochfesten martensitischem Stahl – der zuvor erwähnte 54SiCr6 – mit einer Bruchfestigkeit



Abbildung 1: Beispiele von beim Umformprozess gebrochener Druckfedern. Bilder: Università degli Studi di Padova

zwischen 1800 MPa und 1900 MPa, ohne Einschlüsse und Risse, soll zu einer spiralförmigen Feder mit variablem Windungsdurchmesser und unterschiedlicher Axialteilung kaltgeformt werden. Der Draht hat eine kompakte oxidierte Oberfläche – bekannt als „Black Oxide“, hauptsächlich Fe_2O_3 –, die als Festschmiermittel während der Umformung der Feder dienen soll.

Einfluss von Reibung und Aufbau

Der Durchmesser des Drahts liegt bei 14,5 mm, der innere Durchmesser der Windungen zwischen 85 mm und 60 mm und die Axialteilung variiert zwischen 55 mm und 32 mm (Abbildung 2). Der Umformvorgang dauert insgesamt 6 s. Bei der Umformmaschine handelt es sich um ein programmierbares Wafios-System mit beweglicher Teilungsschiene und zwei Formgebungswalzen, die eine reduzierte Reibung zwischen Draht und Werkzeug ermöglichen. Die Vorschubrollen führen den Draht mit einer Geschwindigkeit von 670 mm/s.

Unter Verwendung unterschiedlicher Produktionschargen des Drahts entstanden während des Produktionsprozesses der Feder einige Bruchstellen. Der Schaden bestand aus einem Oberflächenriss, der unmittelbar zu einem Bruch der kompletten Feder führte. Bei der Analyse der unterschiedlichen Produktionschargen des Drahts zeigten sich annähernd identische mechanische Eigenschaften – Bruchfestigkeit, Elastizitätsmodul, Streckgrenze sowie Härte-, und auch die mikrostrukturelle Analyse ergab keine signifikanten Unterschiede. In einer mikroskopischen Bildanalyse konnten jedoch unterschiedliche Oxidschichtdicken festgestellt werden. Die Prüfung der Oxidschicht mit einem Nano-Kratztest förderte zu Tage, dass die Chargen mit geringer Oxidschichtdicke ein anfälligeres Verhalten der Schicht aufwiesen. Diese konnte sehr leicht brechen und die darunterliegende Stahloberfläche freigeben.

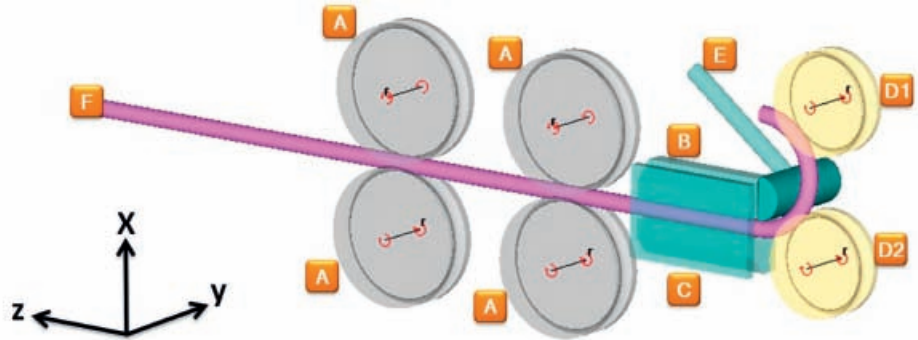


Abbildung 3: Simulationsmodell des untersuchten Umformprozesses.

Eine Oxidschichtdicke von über 8 μm erwies sie sich als besser haftend und stabiler. Eine anschließende Untersuchung der Federbruch-Stellen brachte in der Nähe des äußeren Biegeradius einen abgeflachten Bereich von 4 mm bis 5 mm Breite zum Vorschein, in dem das Oxid nicht mehr vorhanden zu sein schien. Die Laborergebnisse lassen darauf schließen, dass die Schädigung beim Wickelprozess in keinem direkten Zusammenhang mit den mechanischen Eigenschaften des Stahls, den Prozessparametern des Wickel-

mentellen Analyse der Produktionschargen lassen den Schluss zu, dass das Zusammenspiel zwischen Maschinenkonfiguration, Reibung und der Oxidschicht während des Umformungsprozesses des Drahts eine inakzeptable Materialschädigung verursachen kann. Zum besseren Verständnis dieser Schädigungseffekte wurde ein numerisches Modell des Federwicklungsprozesses entwickelt, welches das Lemaitre-Schadensmodell in der Beschreibung der Materialeigenschaften berücksichtigt.

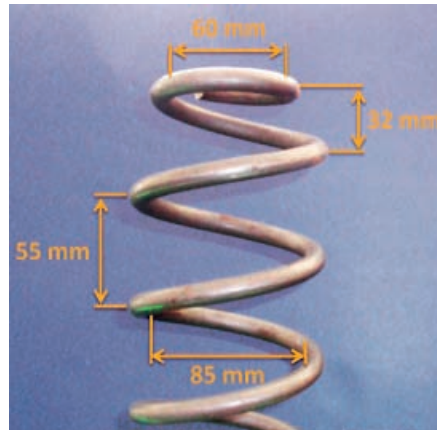


Abbildung 2: Geometrie und Maße der herzustellenden Feder.

vorganges oder der Konfiguration der Formgebungswalzen steht. Vielmehr steht sie in direktem Bezug zur Oxidschicht und deren Interaktion mit den Vorschub- und Formgebungswalzen. Die Erkenntnisse der experi-

Wicklung numerisch modelliert

Die relative Schädigung wurde als Index genutzt, um das Fehlerrisiko bei unterschiedlichen Reib- und Prozessparametern einzuschätzen. Zur dreidimensionalen Analyse der vorherrschenden Mechanik des Wicklungsprozesses wurde das Programm Simufact.Forming 10.0 genutzt, wobei der Draht mit einer konstanten Geschwindigkeit von 670 mm/s geführt wurde (Abbildung 3). Die Rotationsachse der Formgebungswalzen lag auf der y-Achse. Zur Vernetzung des Drahtes wurden Hexaeder-Elemente mit einer Größe von 2,4 mm eingesetzt. Zwischen dem Draht und denjenigen Teilen der Wickelmaschine, bei denen Gleitkontakte auftreten, wurde das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein der Oxidschicht durch niedrige/hohe Reibungswerte simuliert. Zwischen Draht und Rollen wurden entsprechend niedrige Rollreibungswerte angesetzt. Zur Modellierung der Reibung zwischen Draht und den unterschied-

lichen Teilen der Maschine wurde ein kombiniertes Coulomb/Tresca-Gesetz verwendet. Die Variation des Windungsdurchmessers – 85 mm bis 60 mm – konnte durch eine Bewegung der oberen Formgebungsrolle von 29 mm in X-Richtung simuliert werden. Der Andrückeﬀekt der Vorschubrollen, der ein Abrutschen des Drahts verhindert und das Abﬂachen des Drahts bewirkt, wurde durch eine Bewegung der Rollen von 0,5 mm in X-Richtung abgebildet, sobald der Draht abzurutschen drohte.

Analyse des Federwickelprozesses

Mit dem erstellten numerischen Modell konnten nun Simulationen des Wickelprozesses mit verschiedenen Reibungs- und Prozessparametern erfolgen. Die berechnete relative Schädigung wurde als Index zur Abschätzung des Fehlerrisikos genutzt. Ein Indexwert von 0 entspricht einem ungeschädigten Material, ein Versagen wird erwartet, wenn der Index den kritischen Wert 1 erreicht. Die Simulationen umfassten insgesamt drei verschiedene FEM Analysen mit jeweils zwei unterschiedlichen Prozessbedingungen. Als Prozessbedingungen wurden eine dicke und fest haftende sowie eine dünne Oxidschicht angenommen, die beim Durchführen des Drahts zwischen den Vorschubrollen bricht.

In der ersten FEM-Analyse wurde die Kaltumformung einer Spiralfeder mit einem konstantem Windungsdurchmesser von 85 mm und einer konstanten Axialteilung von 55 mm simuliert. Die maximale relative Schädigung entstand am Bogenrücken des Drahts und variierte zwischen 0,187 und 0,425. Für die zweite FEM-Analyse wurde ein konstanter Windungsdurchmesser von 60 mm angenommen. Da die Biegung des Drahts für eine Windung von 60 mm höher liegt als bei einer Windung von 85 mm, wurden höhere Schädigungswerte erwartet. Wie im vorherigen Fall zeigte sich die maximale relative Schädigung am Bogenrücken des

Drahts und variierte von 0,481 bis 0,741. Diese Ergebnisse bestätigten, dass der Radialdruck der Rollen auf den Draht eine Materialschädigung verursacht, ließen jedoch keine Rückschlüsse auf das Fehlerrisiko für den Wickelprozess zu.

Bei der dritten FEM-Analyse wurde der Windungsdurchmesser der Feder zwischen 85 mm und 60 mm sowie die Axialteilung zwischen 55 mm und 32 mm variiert (Abbildung 4). Die maximale relative Schädigung lag wieder am Bogenrücken des Drahtes und

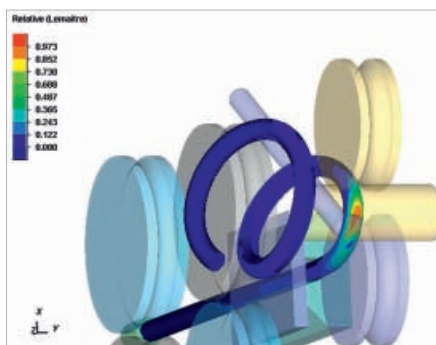


Abbildung 4: Relative Schädigung beim Umformen einer spiralförmigen Feder mit zwischen 80 mm und 60 mm variierendem Windungsdurchmesser.

variierte, abhängig von den Prozessbedingungen, von 0,488 bis 0,973. Bei hohem Druck der Vorschubrollen war der Schädigungsgrad mit 0,973 höher und zeigte ein deutliches Fehlerrisiko während des Wickelprozesses an. Daraus folgt, dass die Variation der Durchmesser und der Axialteilung in Kombination mit einer dünnen und nicht haftenden Oxidschicht zu Fehlern beim Wickeln des Drahts führen kann. Dieses Ergebnis wurde durch die Analyse der gebrochenen Federn bestätigt, da die Bruchstelle in dem Bereich liegt, in dem eine Variation des Durchmessers durchgeführt wird. Die Herstellung von Federn durch Kaltumformung von zuvor gehärtetem Stahl ist kritisch, wenn die Bruchfestigkeit des Materials über

1800 MPa liegt. Die Qualität und die Dicke der Oxidschicht auf der Drahtoberfläche beeinflusst maßgeblich den Erfolg des Wickelprozesses, da das Oxid als Festschmiermittel agiert. Ohne die Schicht treten höhere Reibungskräfte auf, die höhere Umform- und Vorschubkraft zur Folge haben. Dies kann eine Materialschädigung an den Drähten einleiten und schließlich den Bruch der Windungen verursachen. Das für die Simulation der Wickelprozesse entwickelte numerische Modell in Simufact.Forming 10.0 kann solche Effekte berücksichtigen. Die Implementierung der duktilen isotropen Schädigungsformulierung auf Basis der Lemaitre-Formulierung ermöglicht eine korrekte Vorhersage der Fehler. Dank der Umformsimulation kann so das Zusammenspiel unterschiedlicher Maschineneinstellungen und Reibungsverhältnisse untersucht und für den angestrebten Prozess eine Konfiguration mit minimalem Fehlerrisiko bestimmt werden.

Guido Berti und Manuel Monti, beide Universität degli Studi di Padova

Der aus dem Englischen übersetzte und redaktionell gekürzte Beitrag ist im unter dem Originaltitel „Experimental and numerical analysis of the cold forming process of automotive suspension springs“, veröffentlicht in www.utfscience.de.



www.drahtmagazin.de

Fanden Sie den Beitrag nützlich?
Sähen Sie gerne mehr zum Thema im Heft?
Stimmen Sie ab: www.drahtmagazin.de

Università degli Studi di Padova

Stradella San Nicola 3
36100 Vicenza, Italien
Tel.: +39 0444 998724
Fax: +39 0444 99889
E-Mail: info@unipd.it
Internet: www.unipd.it